

領域略称名：量子イメージング  
領域番号：2508

平成27年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「(研究領域名) 3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イ  
メージングの展開」

(領域設定期間)

平成25年度～平成29年度

平成27年6月

領域代表者 (高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・  
教授・新井 康夫)

# 目 次

## 研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究の進展状況	6
3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況	10
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	11
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	15
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	21
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	23
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	24
9. 総括班評価者による評価	25
10. 今後の研究領域の推進方策	27

## 研究組織

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00	25109001 3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開	平成25年度～ 平成29年度	新井 康夫	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授	3
A01計	25109002 SOI 3次元ピクセルプロセスの研究	平成25年度～ 平成29年度	新井 康夫	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授	4
A02計	25109003 SOI 技術を用いた極低ノイズ・高速イメージングデバイスの研究	平成25年度～ 平成29年度	川人 祥二	静岡大学・電子工学研究所・教授	4
B01計	25109004 宇宙最初期ブラックホールの探査研究を実現する衛星搭載X線精密イメージングの開拓	平成25年度～ 平成29年度	鶴 剛	京都大学大学院・理学研究科・教授	4
B02計	25109005 ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く 極低温 SOI 赤外線イメージングの開拓	平成25年度～ 平成29年度	和田 武彦	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教	4
C01計	25109006 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング	平成25年度～ 平成29年度	坪山 透	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師	7
C02計	25109007 X線自由電子レーザーによる超高速ナノ構造解析用検出器	平成25年度～ 平成29年度	初井 宇記	理化学研究所・データ処理系開発チーム・チームリーダー	4
D01計	25109008 放射光を用いた空間階層構造とダイナミクス研究のためのイメージング	平成25年度～ 平成29年度	岸本 俊二	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授	5
D02計	25109009 投影型イメージング質量分析による迅速で高解像度な生体内分子イメージング	平成25年度～ 平成29年度	栗津 邦男	大阪大学・工学研究科・教授	4
計画研究 計9件					

A01-I 公	26109502 PSS-SOI 高分解能検出器の 開発および応用	平成26年度～ 平成27年度	島添 健次	東京大学・工学系研究科・助教	1
A01-II 公	26109505 ワイドレンジプラズモン フィルタを実装した SOI 量子イメージセン サの開発	平成26年度～ 平成27年度	小野 篤史	静岡大学・電子工学研究所・准教授	1
A02-I 公	26109504 軟 X 線用の背面反射回 折環二次元イメージン グ機構の開発	平成26年度～ 平成27年度	佐々木 俊彦	金沢大学・人間科学系・教授	1
A02-II 公	26109508 究極のエネルギー分解 能を持つ大面積 X 線検 出器の開発	平成26年度～ 平成27年度	石野 宏和	岡山大学・自然科学研究科・准教授	1
B01-I 公	26109506 XRPIXの位置分解能向上と G2格子不要のX線タルボ干 渉計の開発	平成26年度～ 平成27年度	林田 清	大阪大学・理学（系）研究科（研究 院）・准教授	1
B01-II 公	26109503 中性子星の磁場構造を解き 明かす X 線偏光イメージャ ーの開発研究	平成26年度～ 平成27年度	平賀 純子	関西学院・理工学部・准教授	1
C02 公	26109501 SOI 技術を用いたイメ ージセンサの重粒子線 への応用	平成26年度～ 平成27年度	松村 彰彦	群馬大学・重粒子線医学推進機構・ 助教	1

公募研究 計7件

# 研究領域全体に係る事項

## 1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

### 研究領域の目的

目に見えない X 線・赤外線・荷電粒子線等の量子線を用いた測定では、量子それぞれを可視化する事が重要である。超微細画素の半導体センサによりこれら量子線データを高速・大量に取得し、2次元、3次元、さらに時間軸を加えた4次元画像として再構成を行うと、予期せぬ構造の発見や知見を得る事が可能となる。

例えば、ノイズを極小として個々の量子の検出を行い、そのエネルギーと到来数を精密計数することで、原理的にダイナミックレンジ 10 桁以上の高コントラスト画像を得ることが可能である。さらに、到来時刻、波長、偏光特性、荷電粒子の種別と運動エネルギーなど、量子それぞれが持つ物理量の同時計測も原理的に可能である。これらの実現は、量子イメージングの究極の目標である。しかし既存の計測デバイスの性能や機能は、これらの要求からは程遠く、素核・宇宙・物質・生命科学に飛躍の進展をもたらす本質的に優れた量子イメージングデバイスの開発が求められている。

このような要求に対し、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、二種類のシリコン層を絶縁層を介して張り合わせたシリコン基板技術 Silicon-On-Insulator (SOI) を使い、高感度センサと集積回路とをピクセル内で3次元的に一体化させた革新的な放射線イメージング検出器(図 1 左)の開発に成功し、実用センサとしての技術の成熟を図ろうとしている。この SOI ピクセル検出器は、究極の量子イメージングを実現する上で理想的な構造を有している。つまりセンサと回路が一体として半導体微細加工技術で製造され、SOI の 2 つの Si 活性層をセンサと処理回路として独立に最適化し、裏面照射により理想的な量子効率を実現できる。また2つの活性層のいずれにも能動素子を形成することができ、この 2 重活性層を利用することで、単一量子の検出と極低ノイズでの量子エネルギー計測を同時に行うデバイスなど、CCD 等の従来型デバイスでは実現できない、量子イメージングにとって理想的な新機能を SOI 検出器は実現できる将来性を持つ。

このような新奇 SOI ピクセル検出器の物理的特性と最適構造の探求について、学術的な興味をもつ半導体デバイス研究者と、新たなイメージング測定を求めている多分野の先端計測研究者が集まり、全く新しい形の研究開発集団として本領域研究を提案する事となった。本領域研究によって、新たなデバイスの創出と、革新的な計測手法を実現する新しい融合研究領域をつくり、ひいては新しい科学的発見を加速する。

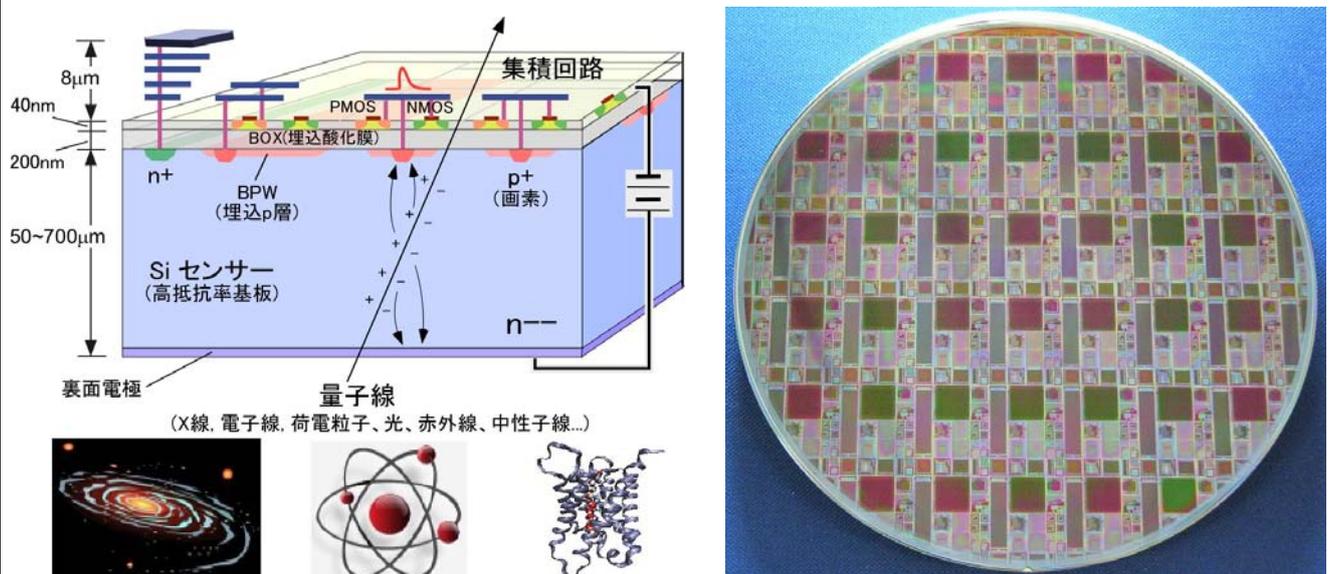


図 1. (左)SOI ピクセル検出器の概念図。放射線により下部センサで発生した電荷は電場により電極に集められ、絶縁層上の集積回路により処理される。これにより宇宙から生命までのさまざまな分野で使える検出器を開発し、新たな研究領域を拓く。(右)KEK で行った様々なチップを載せた SOI MPW ランウエハー(8インチ)。各区分に様々な設計のチップが載っている。

## 研究領域の概要

本計画では、SOIピクセル検出器を通じて量子イメージング原理を革新し、素核・宇宙・物質・生命科学の新たな領域を開拓することを目指す。また、多分野の研究者が協力する事により新たな学術領域を創生し、期間内に各計画研究で日本独創の革新的機能を持つSOIピクセル検出器を完成させる(図2)。計画研究を4つの大きなグループに分け、それぞれ以下のような役割を果たす。

**コア技術グループ**・A01 プロセスとA02 デバイス班は協力して、SOIによる量子イメージングへの新しいデバイス構造を創造し、最適化及び極限性能を追求する。B～Dの各班と連携、融合的研究を展開し、新機能SOIピクセル検出器を開発する。

**宇宙グループ**・X線班(B01)は、低ノイズで精密分光の行えるX線カメラを完成する。トリガー信号出力と高速読み出しを可能とし、X線CCDでは不可能な超低バックグラウンドを実現し、宇宙最初期ブラックホール探査研究を行う。赤外線班(B02)は、SOIのヘリウム温度動作を活かし、熱励起暗電流雑音を極限まで減らした、光赤外線イメージセンサを実現する。期間内に気球実験を行い、ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く。両班は協力して、衛星搭載品の実用化を行う。

**先端加速器グループ**・素粒子班(C01)は、ピクセル毎に高度なデータ処理回路を持つ高機能検出器を完成する。次世代素核実験の標準検出器を確立し、ヒッグス粒子などを通じて標準理論の枠組みの研究を行う。XFEL班(C02)は、1光子計測と大信号計測を両立させ、X線自由電子レーザー(XFEL)実験に投入し、検出器に制約されない実験を可能にする。両班は協力し高輝度放射線下で高性能動作する検出器を開発する。

**生体・物質構造グループ**・放射光班(D01)では、遷移金属酸化物、有機強誘電体などの電子状態や局所構造の外場応答・時間依存性を測定するため、現在のCCD検出器の10倍以上の速度で時間分割分光/回折測定が行える、高精度・高速読み出し可能なX線イメージングデバイスを開発する。分子イメージング班(D02)は、投影型イメージング質量分析に必要なイオンの位置と飛行時間の同時測定を実現し、空間分解能1 $\mu\text{m}$ での測定を可能にする。1画像取得を、従来必要だった数十時間スキャンから数分で取得できるようにし、測定の劇的な質的变化をもたらす。

本領域は上記のように、半導体デバイスを専門とするA班と、高度な計測システムを実現するB,C,D班がお互いの領域に深く入り込み、一体となって今までにないものを生み出す。この点に連携の最重要ポイントがあり、また本領域の要となる。総括班はこの実現の為、強力なリーダーシップのもと、相互レビュー、共同研究コーディネータの設置、融合研究体制の構築、評価手法の融合等を実行していく。

宇宙 素粒子 物質 生命

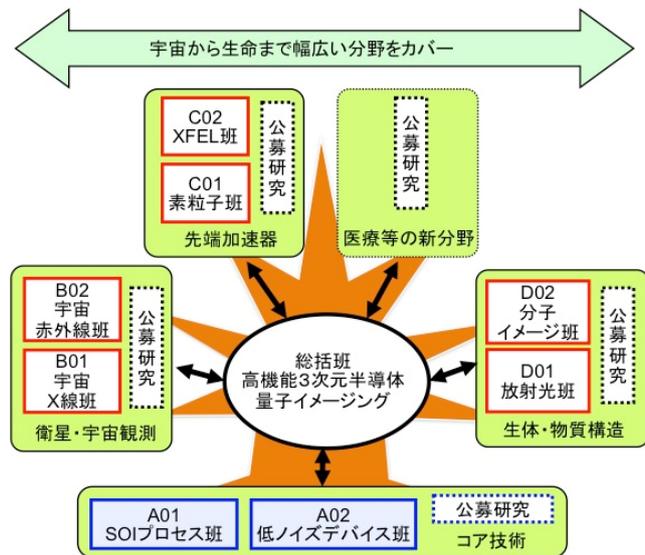


図2. (左)本領域の研究戦略。SOI検出器をコアに、プロセス・デバイス・放射線耐性等の様々な面の研究を行い、新たな量子イメージング手法を確立。宇宙・素粒子・物質・生命等のさまざまな分野において、新たな領域を切開く。(右)SOIピクセル検出器技術をコアに、様々な分野の研究者が協力して、新たな量子イメージング分野を切開く。

## 2. 研究の進展状況 [設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する] (3 ページ程度)

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

### A01: SOI 3次元ピクセルプロセスの研究

本研究班では、SOIピクセル検出器の元となるSOIウエハー・プロセスの開発を行い、従来の検出器では実現不可能な性能を持った量子イメージング用センサ・プロセスの開発を行い、各研究班の為に相乗りプロセス(Multi Project Wafer: MPW)を主導することを目的としている。

これまでにMPWランを2014年1月及び10月に行い、それぞれ計画研究班及び公募研究班より15件、21件の設計が集まりプロセスを行った(図3)。プロセスは4種類のウエハー(CZ n型、FZ n型、FZ p型、Double SOI p型)を用いて行い、表面側プロセス終了後、ウエハーを薄く削り、裏面側のインプラント・レーザアニーリング等を行った。完成したウエハーはチップ毎に切り出し、一部をパッケージに実装後、設計を行った各計画研究班に配布した。

放射線耐性の向上とクロストーク削減を目指し独自に開発したSOI層を2重にしたDouble SOIウエハー開発も行き、放射線照射試験やクロストーク測定等も行った。100kGy(Si)の照射後でも中間Si層に適切なバイアスをかけることで、動作することが確認され、またクロストークも大幅に減少する事が確認された。また、中間Si層に高電圧をかける事で、酸化膜中にトラップされたホールを抜く研究も行っている。

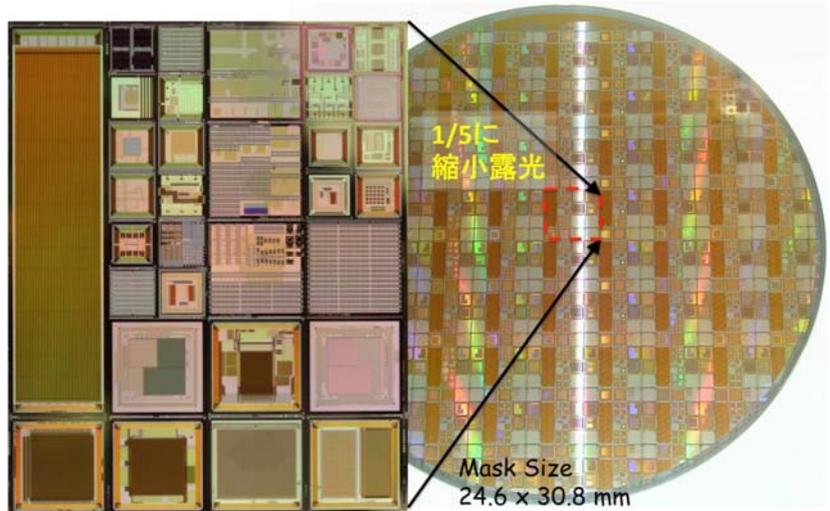


図 3. MPW ランのマスクとウエハーの写真。

### A02: SOI 技術を用いた極低ノイズ・高速イメージングデバイスの研究

本研究班ではSOIピクセル検出器をB,C,D班の各サイエンス分野に応用し、その計測性能を格段に向上させるための以下の4つの要素技術開発と、連携研究による検出器開発を行っている。

[1] イベント駆動型低ノイズ・広ダイナミックレンジ信号検出回路技術、[2] 2重活性層を利用した極低ノイズ高電荷収集効率SOIピクセルデバイス技術、[3] 高時間分解完全空乏型ロックインSOIピクセルデバイス・回路技術、[4] 3次元積層型SOIピクセルデバイス・回路技術。

これまでの2年間で、[2]の要素技術に関し、大きな進展がみられた。高精度・極低ノイズ量子線イメージングを実現するため、SOI回路の安定動作と、極微小容量検出による極低ノイズ化を可能とする基本素子構造について検討を重ね、BPSPIX (Backgate-surface Pinned SOI PIXel)の着想を得た(図4左)。このピクセル素子構造によって、SOI回路のバックゲート部に相当する基板表面の電位を固定化させながら、その他の基板全体を空乏化して電荷検出部にキャリアを高速に導く電界を形成することができ、電荷収集効率をほぼ100%に高め、極微小容量検出による超高感度化が可能となる(図4右)。最近の試作により基本動作を確認し、従来に比べ格段に高い30uV/電子の変換利得と、8電子のノイズレベルが達成された。これらは、今後更に向上させる事ができると考えられるが、現状でもノイズレベルは従来比で4分の1に改善され、量子イメージングにおけるエネルギー分解能を4倍以上改善する可能性を示すことができた。

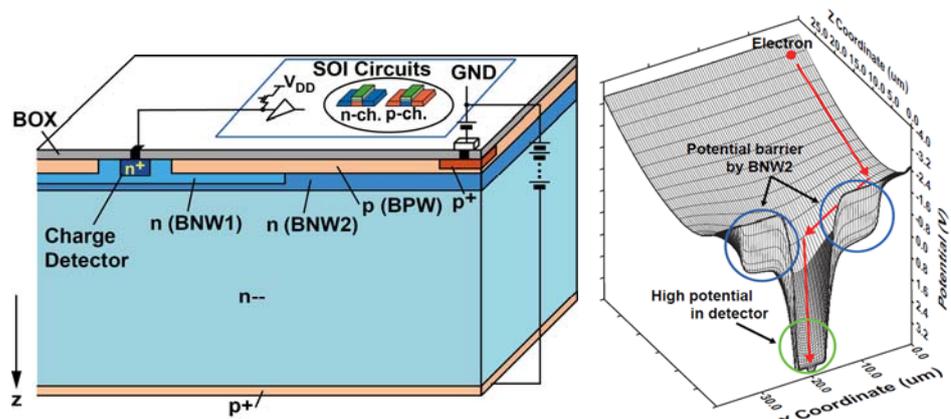


図 4. (左)BPSPIX 構造図。(右)BPSPIX 2次元電位分布。

また、[3]の高時間分解完全空乏型ロックイン SOI ピクセルについても、BPSPIX を基本構造として、4出力型ロックインピクセルの試作に成功し、50 倍以上の消光比が確認された。本全空乏基板(基板厚 $>150\mu\text{m}$ )によるロックインピクセルは、950nm 帯近赤外光を用いた高分解能飛行時間型レンジイメージングや X 線自由電子レーザーを用いた超高時間分解計測を可能にする基本素子として活用できるものであり、今後具体的な応用素子開発を進める。また、[1]のイベント駆動でも、100eV から 10keV にわたる広い範囲で高エネルギー分解能の計測を可能にする高感度広ダイナミックレンジのピクセル回路について試作を完了し、基本性能の確認を進めている。[4]の3次元積層型 SOI ピクセルデバイス・回路技術に関しては、3 次元積層を考慮した物理設計・回路設計を統合検証する環境を構築するとともに、3 次元実装マイクロバンプ接続によるトランジスタの圧力ひずみ特性等を明らかにした。

他班との連携研究としては、BPSPIX に必要なプロセス開発について A01 班と連携して進めているとともに、宇宙 X 線イメージングに応用するための B01 班との連携研究を実施し、衛星搭載用の大判センサ(24.6mm  $\times$  15.3mm、608  $\times$  384 画素)等の試作に貢献している。D02 班との連携では、デジタル多段時間計測回路の同期手法について特許出願を行った。本手法により、1 ナノ秒分解能でのイオン質量分析が可能となる。また、公募研究の A02-II 班が進める SOI KID(超伝導高エネルギー分解能 X 線検出器)、A01-I 班が進めているプラズモニック波長フィルタ等への協力等、領域内での有機的な連携を行っている。

### B01: 宇宙最初期ブラックホールの探査研究を実現する衛星搭載X線精密イメージングの開拓

本研究では X 線エネルギーの高分解能測定、裏面薄膜処理開発による低エネルギー X 線検出、ヒットトリガー信号を使った荷電粒子バックグラウンド低減方式の研究、敷詰型の検出器開発等を行う事を目的としている。

まず、小さな素子(チップサイズ 2.4mm 角-6.0mm 角)を製作し、高い頻度でフィードバックを掛ける事にした。その 1 例として 6mm 角素子を図 5 に示す。この素子は図の左と下にのみにボンディングパッドを持つ、2 サイドバタブル型である。硬 X 線に対する感度は、空乏層の厚みで決まるため、センサ部には Floating Zone 法で製造した高比抵抗シリコンウェハを用い、200V のバイアス電圧で 500  $\mu\text{m}$  厚の完全空乏化が達成出来た。

分光性能の開発は、まず全ピクセルを読み出す「フレーム読み出しモード」で進めている。開発当初は Cd-109 で 22keV X 線とおぼしき「肩」を見いだすレベルであったが、その後読み出しノードの寄生容量を減らし、電荷有感アンプを組み込む等の努力を行い、性能が向上しエネルギー分解能 320eV@6keV を達成し、Fe-55 の Mn-K $\alpha$  と K $\beta$  の分離に成功した。

トリガー信号を用いたイベント駆動読み出しについても、既に 10  $\mu$  秒の時間分解能と、1kHz 以上の高レート検出を達成していて、アクティブシールドによる低バックグラウンドは原理的に達成できると考えている。

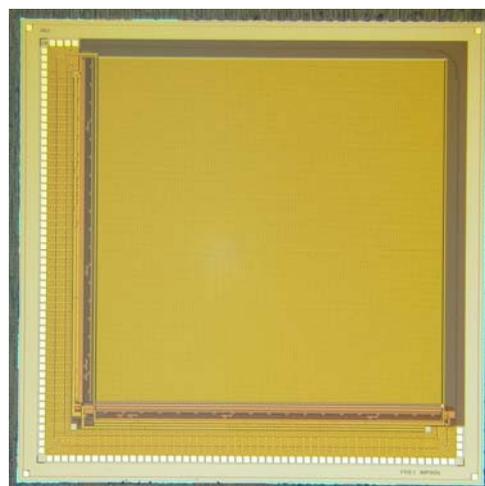


図 5. XRPIX2b 検出器(6mm 角)

### B02: ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く 極低温 SOI 赤外線イメージングの開拓

本研究では、極低温でも動作する SOI CMOS 読みだし集積回路(ROIC)開発、及び光赤外線検出器と組み合わせ高画素 遠赤外線イメージセンサを実現することを目的としている。

ROIC 用のパルスチューブ冷凍機式クライオスタットの開発し、ROIC の設計・評価や側面入射型検出器の開発を進めた。これまでに 25 素子、2x5, 5x5, 9x9 素子読み出し集積回路の開発をおこなった(図 6)。

検出器に関しては、ブロッキング層を薄層化した側面入射素子の開発に成功した。薄層化し効率よく光吸収層に電場が印加されるようにした結果、キャビティー無しで 15A/W と高い光電流変換効率を達成した。

シリコン基板支持型ゲルマニウム検出器の開発も行ない、画像センサとするための積層実験も行なった。検出器への不純物ドーピング濃度を最適化することで、目標の波長 200 ミクロンでの感度向上に成功した。シリコン基板による支持は、シリコン製の読みだし回路と熱膨張係数をそろえ冷却時の破損を回避するため、多画素画像センサ実現に必須の技術である。実際に常温接合によりサンプルをつくり、極低温に冷却しても支持構造が破壊しないことを確かめた。ROIC との積層には、冷却時に問題となる接着剤が不要な、ナノ粒子による金コーンバンプを用いることを決断した。極低温画像センサへの応用は初めてとなるため、積層実験をおこなった。

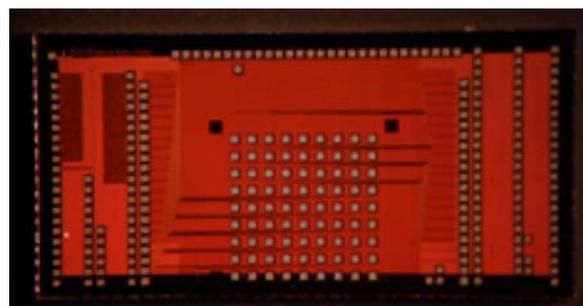


図 6. 試作した 9x9 素子読み出し回路。

## C01: 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング

本研究では測定精度 $1\mu\text{m}$ 以下を目標としたイメージング検出器を実現する為、高速パルス処理回路等の開発、高放射線耐性、効率的な読み出し論理回路等を開発し、ビーム実験等を通じ粒子崩壊点システムとしての性能を実証する事を目的としている。

**[放射線耐性]** 様々の DSOI トランジスタを  $2\text{MGy}$  ( $\text{Co}^{60}$ ) まで照射し、特性変動を評価した。DSOI 電圧を照射量に応じて変化させることで耐放射線性が大幅に向上し、 $500\text{kGy}$  までにはほぼ初期特性に補償できることがわかった。この結果 BELLE-2 や ISL 実験には十分な放射線耐性があることを明らかにした。

**[ILC 用ピクセル]** ILC 加速器の特異なビーム衝突の時間構造を反映させ、チップの基本構造を決定し、テストチップを H26 年度末に投入した。

**[PIXOR チップ]** チップ内でピクセル出力の OR を取り、高速化を図った PIXOR 型チップの評価を行っている。出力電圧は設計より低いですが、下記(4)でのビームテストにより初めて量子ビーム ( $80\text{MeV}$  陽子ビーム)のシグナルを観測した。あと数倍ゲインを上げる必要がある事がわかり、今後対策を施した試験チップを製造し、評価を行う予定である。

**[ビーム試験]** ピクセル軌跡検出器の位置分解能を評価するため大阪大学核理論センター RCNP の  $80\text{MeV}$  サイクロトロン陽子ビームを用いて予備ビーム実験を行った。まだ本計画研究からのチップは存在していないため、既存の SOI ピクセルセンサーを用い、データを収集した。

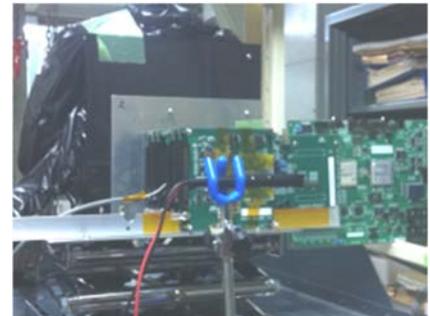


図 7. 阪大でのビーム実験。

## C02: X 線自由電子レーザーによる超高速ナノ構造解析用検出器

本研究では XFEL 用センサ(SOPHIAS)の雑音特性、製造歩留まりおよび広帯域データ処理回路を 2 年半以内に開発し、3 年以内に実用化して XFEL 実験に投入する事を目的としている。これにより、単位面積あたりの最大計測信号量を飛躍的に向上させ、検出器に制限されないコヒーレント回折顕微鏡技術を確立する。

C02 班は小センサでの経験を積み重ねるプロセスを飛ばし、すぐに最終的なサイズのセンサ開発に取り組んだ。これは、協力企業の製造プロセスでは本目的の  $66\text{mm} \times 30\text{mm}$  といった極めて大きな半導体チップを製造した例がなかったこと、および未達成の項目を全て把握し、予定期間内に確実にセンサ開発を終了できるようにするという2つの狙いがあった。また、この経験は後に大チップ開発に取り組む他計画班にも良い影響を与えるとの期待がある。

当初歩留まり問題の解決に時間を要し苦戦したが、歩留まり問題に目処が立ってからは性能向上を着々と進めることができた。特に B01 班との連携により信号電荷の収集効率とピクセルの構造の関係が定量的に解析できる目処が立ったことで、H26年度半ば過ぎには、センサは完成に近いレベルまで持って行くことが出来た(図 8 左)。

XFEL を利用した性能検証実験を前倒して H26年度12月に XFEL 施設 SACLA において行った。酸化コバルトのナノ粒子(diameter  $22\text{nm}$ )の小角散乱をの測定結果を図 8(右)に示す。SOPHIAS センサは、諸外国で開発されているセンサの目標性能と比較しても極めて大きなダイナミクスレンジを持ち、既存のセンサと比べ10倍以上良く、スイス PSI 研究所で開発中の Jungfrau 検出器と同程度であった。26年度に low ゲイン回路のゲインを下げる事が出来たため、Jungfrau 検出器と比べても3倍以上高性能のセンサを実現できた。

センサ2個を内蔵し、ペルチェ冷却機能を持つカメラシステムも構築した。このカメラシステムは計 48 チャンネルの  $25\text{MHz}$  14 bit-ADC を内蔵し、 $7.4\text{Gbps}$  の広帯域データを PC サーバに伝送表示するシステムとなっている。SACLA へのデータ処理系への接続も完了し、全データをディスクストレージシステムで保存できることを確認した。

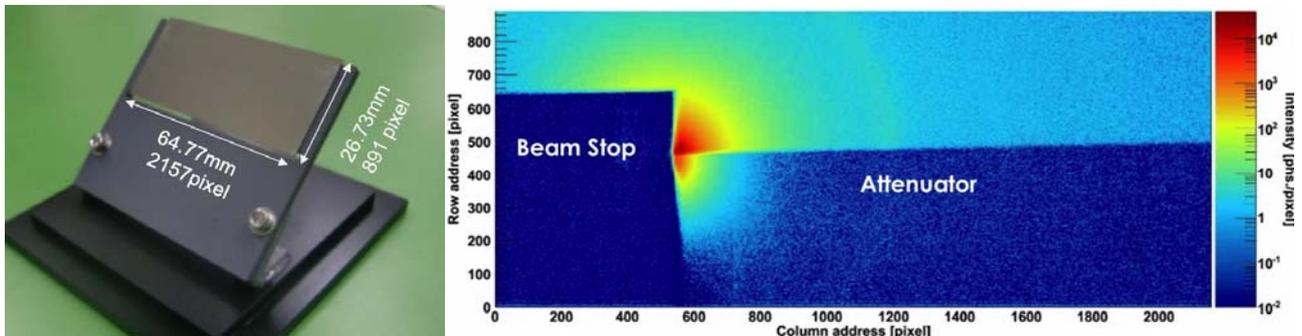


図 8. (左)完成した SOPHIAS センサ。セラミックパッケージにマウントされ、高効率で冷却可能な機構を備えている。(右)SACLA BL3 で測定した小角散乱パターン。1光子レベルから 10,000 光子以上の高強度の散乱まで定量的に信頼性のある形で計測できている。X 線エネルギーは  $6\text{keV}$  である。

### D01: 放射光を用いた空間階層構造とダイナミクス研究のためのイメージング

本研究では放射光 X 線を用いた機能性物質構造の外場応答とダイナミクスの研究を行う事を目的に、時分割測定に行えるメモリ内蔵ピクセル検出器を開発する。

パルス計数型 SOI センサとしての確実な動作を実証するため、まずピクセルサイズ:  $64\ \mu\text{m}$  角、 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  サイズ、 $32 \times 32$  アレイを有するパルス計数型 TEG (Test Element Group) を A01 班の協力を得て試作した。本領域研究で開発した Double SOI ウェハを使用するためウェハの極性をこれまでの N 型から P 型に変える必要があったが、その後の試験で、センサ回路間のクロストークは従来の 50 分の 1 まで減少できることが確認された (図 9)。

SOI 検出器の応用を速やかに進めるため、C02 班で開発中の SOPHIAS 検出器の PF ビームラインでのテスト実験実施の検討を行うとともに、放射光ビームラインでの SOI センサや検出器システムのテストのために必要な装置の購入、整備を進めた。

また SOPHIAS 検出器による X 線検出器システムの放射光利用研究への導入も行い、PF ビームラインでのテスト実験を行うとともに、実験のために必要な装置の購入、整備を進めた。検出器システムの露光時間と雑音の影響、空間分解能などを確かめたくて、酸化セリウム粉末を使った X 線回折像の記録、カラーゲンや高分子材料のブロックコポリマーを試料とする X 線小角散乱像の取得を初めて行った。十分な時間を確保できなかったものの、記録された入射光子数の評価や空間分解能の高さを示すデータを得ることができた。

前年度に試作を行った TEG について、まずシンプルな Single SOI ウェハの TEG について回路特性評価を進めている。

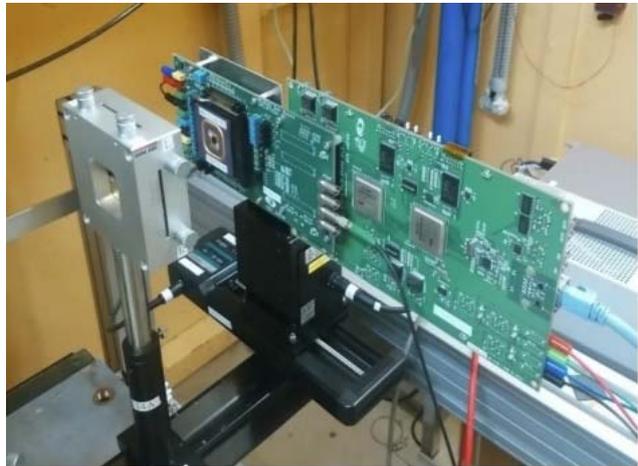


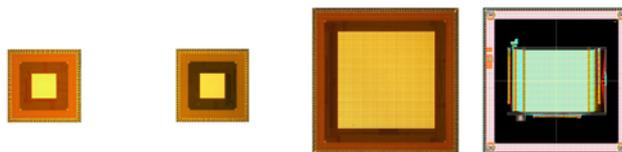
図 9. Double SOI で製作したテストチップの X 線ビームによる試験 (PF BL-14A)

### D02: 投影型イメージング質量分析による迅速で高解像度な生体内分子イメージング

本研究ではイオンの位置と飛行時間を同時かつ高頻度に測定できる SOI ピクセル検出器を開発し、投影型イメージング質量分析装置に搭載する事を目的とする。これにより、生体組織切片や細胞内における脂質、タンパク質などの生体分子や薬剤分子などの高スループットイメージングを可能とする。

A01 班、A02 班の協力の下、投影型 IMS 用のピクセル検出器として MALPIX の試作を図 10 のように 3 回行った。MALPIX の前に設置された MCP にイオンが入射することで MCP から放出される電子群を MALPIX 表面の電極パッドで受ける。入力電荷を MOS トランジスタのゲート容量により電圧に変換し、増幅器の出力が比較器の閾値を超えた時点の時刻 (カウンタの値) をピクセル内のメモリに記録する。

MALPIX3 ではピクセル毎に感度のばらつきが確認されたため、MALPIX4 ではピクセル毎に比較器の閾値を補正する機能を加えた。MALPIX4 では、さらに、時間分解能  $1\ \text{ns}$  を実現するため、本新学術領域研究の領域代表者である新井らが提案した TMC (time memory cell) を組み込んだ。また、MALPIX4 では入力信号の強弱で比較器の応答速度が変化してしまうことがわかったため、MALPIX5 では比較器の前に増幅器を追加し、入力信号の強弱による応答速度の違いを抑制できるように改良した。現在製作中の MALPIX6 では、ピクセル内メモリの変更することでピクセルサイズを  $64 \times 64\ \mu\text{m}^2$  から  $40 \times 40\ \mu\text{m}^2$  に小型化することができた。



	MALPIX3	MALPIX4	MALPIX5	MALPIX6	MALPIX7	MALPIX8
製作年度	H25	H25	H26	H27	H28(予定)	H29(予定)
状況	評価済	評価中	評価中	製作中	計画中	計画中
ダイサイズ [mm <sup>2</sup> ]	3 x 3		6 x 6		1.5 x 24	24 x 24
ピクセル数	16 x 16		64 x 64		32 x 512	512 x 512
セルサイズ [ $\mu\text{m}^2$ ]	64 x 64			40 x 40		
時間分解能 [ns]	8	~2	1(見込)			
時間ダイナミックレンジ	8 bit	12 bit			未定	14 bit
備考		TMC導入、比較器 閾値補正機能追加	TMC改良、比較器 前に増幅器追加	SRAM導入による ピクセル小型化		

図 10. 投影型 IMS 用ピクセル検出器 MALPIX 開発ロードマップ。

### 3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ程度）

審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。  
審査結果の所見は以下の通りであった。

「本研究領域は、高エネルギー加速器研究機構で開発・発展させた SOI ピクセル技術を基に、宇宙・素核・物質・生命科学分野への検出器に応用し、1 個の量子に迫る量子イメージングという新しい領域を開拓しようとする提案である。広い領域にわたる融合・共同研究からなり、様々な分野に発展させることが期待できる。検出器開発や回路開発を大規模に実施し、素核・宇宙・物質・生命科学のフロンティアへの展開を目指すユニークな提案であり、重要な要素技術として領域を設定して推進するに値する。一方で、開発のための開発とならないよう領域としての目標をより明確にすべきと思われる。研究組織は実績のある研究者で構成されており、検出器のコア技術を開発するグループとイメージング素子を異なる分野に応用展開する複数のグループの連携による相乗効果が期待できる。また、総括班には、領域代表者の他に 2 人のデバイス製作と検出器計測の専門家をコーディネータとして置き、各計画研究間の有機的な共同研究を促進する工夫が見られる。半導体技術の継承のため教育コースを開催するなど、若手人材の育成に配慮している点も評価できる。ただし、公募研究の採択予定件数が少ないため、共用設備の利用等により、1 件当たりの上限額を小さくするなど、より多くの公募研究を採択できるようにすべきである。」

この中で指摘を受けた 2 点に対し、下記のような対応を取った。

#### (1) 「開発のための開発とならないよう領域としての目標をより明確にすべきと思われる」

各計画研究及び公募研究はそれぞれ明確な学術目的を持って開発をスタートしている。コア技術開発班とサイエンスを目的とした研究班とは頻りに交流を行っており、両者において開発のベクトルは一致していると考えられる。また総括班会議や研究会において、すべての研究班に発表してもらい全体で議論を行う事で、常に領域研究として目指す方向を確認している。また計画研究、公募研究の全てを網羅したパンフレットを協力して作成した（図 11）。

#### (2) 「公募研究の採択予定件数が少ないため、共用設備の利用等により、1 件当たりの上限額を小さくするなど、より多くの公募研究を採択できるようにすべきである。」

当初計画では5件の公募研究を予定していたが、多くの応募があった事と指摘を受けた点を考慮し、H25 年に公募した研究では7件の公募研究を採択した。H27 公募予定の研究でも、同数程度の採択を行いたいと考えている。

領域研究宣伝パンフレットの概要:

- 見たい」を「見える」に!**  
~SOI検出器で量子イメージングを革新~
- 領域概要:** SOI技術の概要、検出器の性能、応用分野（宇宙・素核・物質・生命科学）。
- 本領域の目的:** SOI技術を用いた量子イメージングの革新、検出器の開発と応用。
- 本領域の内部:** SOI技術の開発と応用の現状、今後の展望。

図 11. 領域研究宣伝パンフレット。

#### 4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ程度）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

[計画研究]

##### A01: SOI 3次元ピクセルプロセスの研究

SOI層を2重にした Double SOI ウエハ（図 12 左）を独自に開発し、放射線耐性の向上やクロストークの削減に効果が得られた。実際に放射線照射試験を行ったところ、100kGy(Si)の照射後でも中間 Si 層に適切なバイアスをかけることで、動作することが確認された。また、中間 Si 層に高電圧をかける事で、酸化膜中にトラップされたホールを抜く研究も行った。クロストークについても図 12(右)に示すように、通常の Single SOI に比べてクロストーク量が 20 分の1程度まで減少することが確認された。

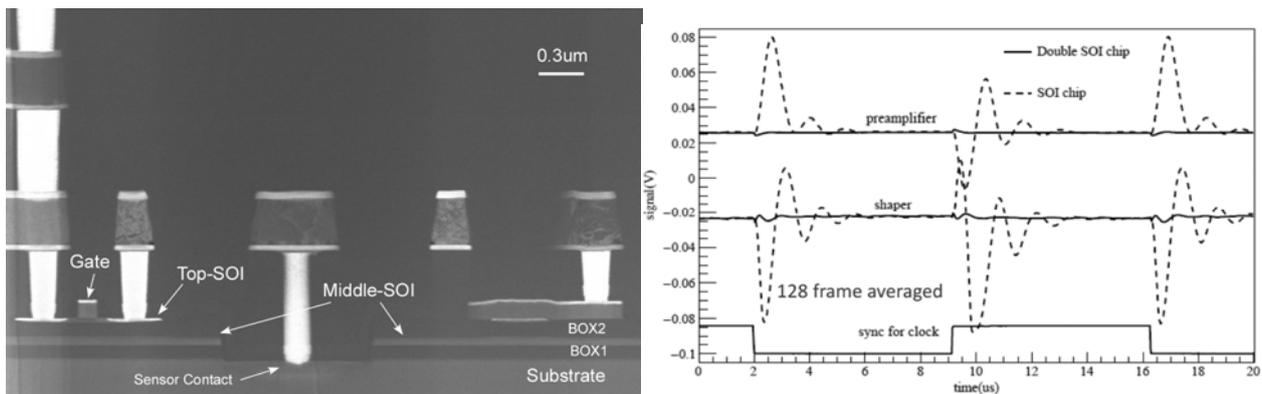


図 12. (左) Double SOI ウエハ断面写真。(右) 通常の SOI ウエハ (Single SOI) と Double SOI ウエハ とでのセンサー・回路間クロストーク量の比較。Double SOI 化することで 1/20 に減少した。

##### A02: SOI 技術を用いた極低ノイズ・高速イメージングデバイスの研究

独自のセンサ開発に加え多くの研究班と共同でセンサ開発を行い、その過程で、下記の2件の特許を出願した。

1. 電磁波検出素子及び固体撮像装置、川人祥二、安富啓太、亀濱博紀、特願 2014-127700、出願日 2014 年 6 月 20 日
2. 「デジタル回路及び A/D (Analog/Digital) 変換回路並びにデジタル信号処理方法」、池辺将之、渡辺佳織、特願 2015-093073、2015 年 4 月 30 日

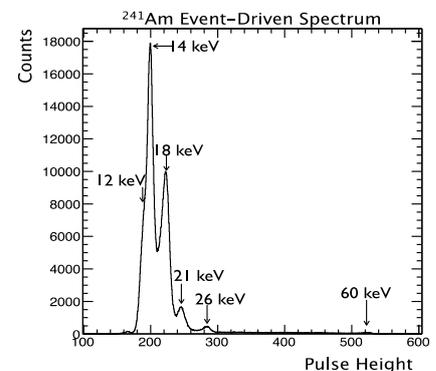


図 13. 常温・蛍光灯下で、XRPIX2b (電荷有感アンプの無い素子) のイベント駆動読み出しモードで得た、Am-241 の X 線スペクトル。

##### B01: 宇宙最初期ブラックホールの探査研究を実現する衛星搭載 X 線精密イメージングの開拓

読み出しノードの寄生容量を減らし、電荷有感アンプを組み込む等の努力を行い、性能を向上させることに成功しエネルギー分解能 320eV@6keV を達成し、Fe-55 の Mn-K $\alpha$  と K $\beta$  の分離に成功した(図 13)。

また、一部のセンサで電荷収集の低下が見られたが、この際は C01 班の支援により SPring-8 において直径 10  $\mu$ m のペンシルビームを利用し、ピクセル内部の電荷収集効率の詳細な測定を行い解決することが出来た。この解析を行った京都大学の松村氏の修士論文は H26 年度の測定器開発・優秀論文賞を受賞している。

##### B02: ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く 極低温 SOI 赤外線イメージングの開拓

シリコン基板支持型ゲルマニウム検出器の開発を行う過程で、不純物(ガリウム)濃度を従来の 1E16/cc から 8E16/cc に高めることで、有効波長を 160 ミクロンから目標の 200 ミクロンを越え 240 ミクロンまで伸長できることを実験により確認出来た。

**C01: 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング**

様々な DSOI トランジスタを Co<sup>60</sup> 線源により 2MGy(Si)まで照射し、特性変動を評価した。DSOI 電圧を照射量に応じて変化させることで耐放射線性が大幅に向上し、500kGy まではほぼ初期特性に補償できる事がわかった。また、DSOI 型積分型ピクセルに対して 100kGy (Co<sup>60</sup>)の照射後でのβ ソースへの応答の測定に成功した(図 14)。

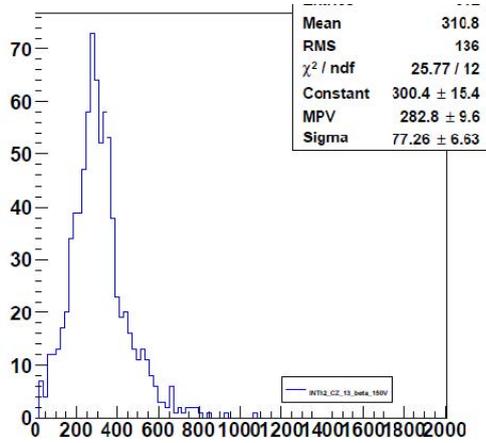


図 14. DSOI を用いたセンサー 100kGy (Co60) 照射後の β ソースへの応答

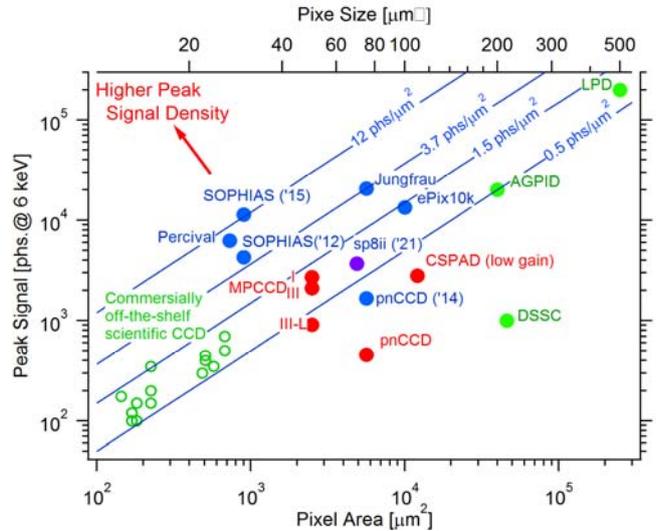


図 15. 現在使用されているもしくは開発中のセンサのピクセルサイズに対するピーク信号値プロット。斜め線は X 線光子 6 keV に対する 1 μm<sup>2</sup>あたりのピーク信号が同一のラインを示す。左上に表示されているセンサがより優れた性能に対応する。

**C02: X 線自由電子レーザーによる超高速ナノ構造解析用検出器**

今回開発に成功した SOPHIAS センサは、諸外国で盛んに開発されているセンサの目標性能と比較しても極めて大きなダイナミクスレンジを持つ。ピクセル面積に対するピーク信号を図 15 に表示した。異なるセンサを比較する際に、単位面積あたりのピーク信号という値が便利な指標となる。SOPHIAS センサの当初性能はスイス PSI 研究所で開発されている Jungfrau 検出器と同程度のピーク信号密度であったが、最終的に low ゲイン回路のゲインを下げることで出来たため、これをも上回る性能を実現できた。英国ラザフォード・アップルトン研究所で開発中の軟 X 線用 Percival センサは高いピーク信号を目標としているが、改良版の SOPHIAS('15、未発表)ではそれをも越えて世界最高となっている。

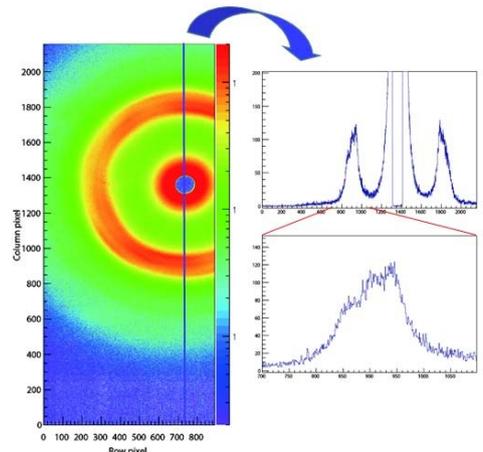


図 16. SOPHIAS 検出器による X 線小角散乱測定 (PF BL-15A2)

**D01: 放射光を用いた空間階層構造とダイナミクス研究のためのイメージング**

SOPHIAS 検出器による X 線検出器システムの放射光利用研究への導入を行い、PF ビームラインでのテスト実験を行うとともに、実験のために必要な装置の購入、整備を進めた。検出器システムの露光時間と雑音の影響、空間分解能などを確かめたうえで、酸化セリウム粉末を使った X 線回折像の記録、コラーゲンや高分子材料のブロックコポリマーを試料とする X 線小角散乱像の取得を初めて行なった(図 16)。十分な時間を確保できなかったものの、記録された入射光子数の評価や空間分解能の高さを示すデータを得ることができた。

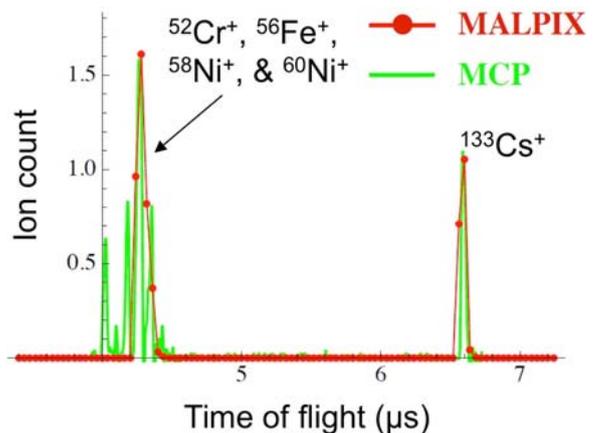


図 17. MALPIX で得られた TOF スペクトラム。

**D02: 投影型イメージング質量分析による迅速で高解像度な生体内分子イメージング**

開発途中の MALPIX により、イオンの到達時間測定を行った。このセンサはまだ微小時間測定回路 (1ns/bit)が実装されてなく、増幅器ゲインも低かったため、複数の近接イオンの分離は行えないにもかかわらず、2次元ピクセル上で図 17 のように TOF スペ

クトルを得る事が出来た。

## [公募研究]

### A01-I: PSS-SOI 高分解能検出器の開発および応用

本研究においては(A)PSS-SOI 検出器の応答評価 (B)高感度陽電子医療プローブへの適用 (C) SOI-GAGG 電子トラック型コンプトンカメラの開発を目的に行っている。(A)に関してはSOIの光応答評価を行い、表面の電極層などの不感層により光への応答が充分ではないことを確認した。現在改良のため電極部分の透明電極への変更の検討およびSi層の薄膜化の検討を行っている。(B)に関しては陽電子プローブ用途として10mm径以下のプローブの作製を行った。(C)に関してはSOIを用いた世界で初めての電子トラッキング型のコンプトンカメラの試作を行った。またSOIを用いたコンプトン散乱電子飛跡のトラッキングが可能であることを確認した。これによりコンプトンカメラの高度化への道筋を得た。

### A01-II: ワイドレンジプラズモンフィルタを実装した SOI 量子イメージセンサの開発

可視光領域+近赤外光領域を各々独立かつ高感度にセンシングする光学フィルタを提案、計算により感度特性を示した。可視光と近赤外光を同一センサ上にて弁別取得することは、従来技術では加工上の観点から実現不可能であったが、本研究では、金属凹凸周期構造を有するプラズモンフィルタにより、本課題が克服されることを計算により示した。提案構造を電子線リソグラフィおよび集束イオンビーム加工を駆使して試作しており、H27年度内に試作したプラズモンフィルタの透過スペクトルを計測し、その有用性を実証する。現在、A02計画研究班の研究分担者である香川先生と、プラズモンフィルタを実装するためのSOIイメージセンサの試作を検討しており、今度のMPWランに投入予定である。

### A02-I: 軟 X 線用の背面反射回折環二次元イメージング機構の開発

軟 X 線による重要機械金属部品の品質評価を高速で高精度化するため、SOIピクセル検出器方式での実現を目標にしている。小型軟 X 線管を用いた基礎実験を行い、感度、耐久性に関する検証を行ない、続いて、デバイリングの計測実験を前方回折について実施し、現状の測定システムで良好なデータを得た。さらに、デバイリングデータの解析を独自プログラムにて進め、残留応力および硬度との対応関係を検証した。これまでに、Cr管球等の軟 X 線による高回折角の回折環を計測するための測定システムを構築でき、鉄鋼材料、ステンレス鋼、ニッケル基合金の回折環を規則できるようになった。

### A02-II: 究極のエネルギー分解能を持つ大面積 X 線検出器の開発

本研究では、大立体角で半導体検出器を超えるエネルギー分解能で X 線を測定する検出器開発を目指す。このために、超伝導検出器と SOIピクセル検出器を融合した新規検出器を提案した。二つのキー技術があり、一つ目は、X 線の基板吸収によって生じたフォノンを検出する超伝導検出器の開発で、フォノンによってクーパー対が破壊されることにより変化する性質を利用した力学的インダクタンス検出器(KID)を用いる。二つ目は、冷凍機の排熱能力(100 $\mu$ W)以下の超低消費電力を持つ SOIピクセル検出器の開発である。SOIピクセルは、300 $\mu$ m 角の大きさを持ち、ピクセルあたり 100nW の超低消費電力にする必要がある。

KIDについては、Alで作成し、アルファ線によるフォノン検出に成功した。しかし、検出器の歩留りが6割程度しか達成できなかった。顕微鏡や段差計を用いた調査ではミスは見つからなかったため、Al薄膜そのものや基板の影響ではないかと考え調査中である。SOIピクセル検出器については、検出器の仕様を決定し、低消費電力を目指した回路設計を、A02班の川人教授の援護のもと行い、2015年5月にMPWランにサブミットした。

### B01-I: XRPIX の位置分解能向上と G2 格子不要の X 線タルボ干渉計の開発

本研究の目的は、SOI 検出器として開発中の XRPIX を用いて、G2 格子を用いない X 線タルボ干渉計を実現することである。そのために、XRPIX を光子計数モードで動作させ、X 線光子1個1個のイベントに関して、検出器中での電子雲のひろがりを利用して、その重心により入射位置を決める。これによりピクセルサイズより一桁下の位置分解能を目指す。

まず XRPIX2b モデル素子と SEABAS ボードからなる動作システムを導入し、X 線検出器としての基本性能を試験した。フレームモードでは少なくとも 14keV 以上の X 線のスペクトル検出に成功し、エネルギー分解能 1.6keV@22keV を得た。イベントモードでも 2keV @22keV のエネルギー分解能を得たが、エネルギー、波高の関係にオフセットが生じるという問題がある。検出器部分を真空チャンバーに入れて冷却するためのシステムを製作中で、これとマイクロフォーカス X 線発生装置を組み合わせて、X 線画像を撮影する計画である。

### B01-II: 中性子星の磁場構造を解き明かす X 線偏光イメージャーの開発研究

SOI 素子を駆動するためのデジタル回路(SEABAS)、アナログ回路を導入し、搭載 SOI 素子として X 線天文学応用を念頭に、京都大学と KEK がノイズの低減を主眼において開発した XRPIX2b 素子等を導入した。初期実験で、実績ある方面照射型(FI)パッケージング品について、有感層暑が異なる二種類の素子(CZ=250 $\mu$ m, FZ=500 $\mu$ m)を試験した。基本動作試験に先立ち、先駆研究グループである京都大学に出向き、情報共有を実施した。

まず、常温動作によるデータ取得機能の検証を試み、CZ 素子、FZ 素子ともにバイアス電圧 5V で X 線イベントを検出していることを確認した。続いて、-80 度まで冷却可能な小型の恒温槽にセットし、温度を下げたことによるリーク電流の低減効果を確認するとともに、低リーク電流環境のもとで、バイアス電圧を徐々に上げていき、検出効率の増加傾向を確認

する実験を行った。その結果、導入した SOI 素子においては、 $-20$  度でバイアス電圧  $200\text{V}$  でも  $0.4\text{nA}$  以下と非常にリーク電流が小さいことがわかった。これは、将来の衛星搭載機器としての設計を考えた際に、ごく低温での運用が必要ないことを意味しており、意義深い。スペクトル性能としては、フレーム読み出しで  $17\text{keV}$  の X 線に対してエネルギー分解能が約  $0.7\text{keV}$  で駆動させることができ、イベント駆動型の読み出しにも成功した。

#### C02: SOI 技術を用いたイメージセンサの重粒子線への応用

本研究では、治療用炭素線場の線量・線質を同時に測定でき、臨床線量の直接推定が可能な、SOI 技術を用いたイメージセンサー (SOPHIAS) の炭素線に対する応答調査を行った。実験は群馬大学重粒子線医学研究センターの垂直コースで行った。本研究では、イメージセンサーの放射線損傷や同一ピクセル内に複数の放射線が同時に入射するのを防ぐため、ビーム強度を下げる必要があった。そこで、ビーム強度を下げた状態で、線量モニタやリファレンスで用いる平行平板型電離箱の健全性の確認を行い、治療で用いるビーム強度のおよそ  $1/40$  の強度で使用することを決定した。様々な水等価深で測定をするため、検出器の上流に水深可変型の水槽を設置し、モノエネルギーの炭素線を用いて電離箱と SOI イメージセンサーでデータ収集を行った。解析の結果、SOI イメージセンサーでブラッグピークを観測できることがわかった。一方で、実験中に加速器のトラブルによりデータ収集効率が予想より低かったため、外部トリガーを用いて自動でデータ収集を行えるように改造を行った。その結果、データ収集効率を 4 倍程度改善でき、高統計でのデータ収集に成功した。

## 5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）（5 ページ程度）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。また、別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。

### 1. 領域ホームページ、<http://soipix.jp/>

#### A01: SOI 3次元ピクセルプロセスの研究

##### [雑誌論文]

- ◎\*M. Motoyoshi, T. Miyoshi, M. Ikebe and Y. Arai, '3D integration technology for sensor application using less than 5µm-pitch gold cone-bump connection', J. of Instrumentation, Jinst 10 C03004 (2015), <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/10/03/C03004>, 査読有
- \*H. Matsumura, T. Go Tsuru, T. Tanaka, S. Nakashima, S. G. Ryu, A. Takeda, Y. Arai, T. Miyoshi, 'Investigation of charge-collection efficiency of Kyoto's X-ray astronomical SOI pixel sensors XRPIX', NIMA, Vol. 765, 2014, pp. 183-186, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.05.025>. 査読有
- Glab, S.; Baszczyk, M.; Dorosz, P.; Idzik, M.; Kucewicz, W.; Sapor, M.; Arai, Y.; Miyoshi, T.; Kapusta, P.; Takeda, A., 'Synthetizable digital library created to facilitate design of SOI detectors in 200 nm SOI technology', 2014 International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES), DOI: 10.1109/ICSES.2014.6948729, 2014, pp. 1-4. 査読有
- \*S. HONDA, K. HARA, K. TSUCHIDA, M. ASANO, N. TOBITA, T. MAEDA, Y. ARAI, T. MIYOSHI, T. TSURU, M. OHNO, N. MIURA, H. KASAI, M. OKIHARA, 'Total Ionization Damage Compensations in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensors', Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, 2-6 June, 2014, Amsterdam, the Netherlands, PoS(TIPP2014)039. 査読有
- \*T. Miyoshi, Y. Arai, et al, 'Monolithic pixel detectors with 0.2 µm FD-SOI pixel process technology', Nucl. Instr. and Meth. A, Vol. 732, December 2013, Pages 530-534, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2013.06.029>. 査読有
- ◎\*Y. Arai and M. Motoyoshi, 'Application of 3D stacking technology to SOI radiation image sensor', IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems (EDAPS), Dec. 12-15, 2013, Nara, Todaiji, Japan. Invited Talk. IEEE Part Number: CFP13EDP-USB, ISBN: 978-1-4799-2312-0, SS1-2, p.5-8. 査読無
- \*Toshinobu Miyoshi, M.I. Ahmed, Yasuo Arai, Yowichi Fujita, Yukiko, Ikemoto, Ayaki Takeda, and Kazuya Tauchi, 'SOI Monolithic Pixel Detector', J. of Instrumentation, JINST\_095P\_1213, 2014, doi:10.1088/1748-0221/9/05/C05044. 査読有
- \*Takayuki Mori, Jiro Ida, 'Mechanism of Super Steep Subthreshold Slope Characteristics with Body-Tied SOI MOSFET', Proceedings of SISPAD Conference, Vol. 1, 2013, pp. 101-104, DOI: 10.1109/SISPAD.2013.6650584. 査読有

##### [学会発表]

- Y. Arai, 2015.3.28-31 National Symposium on Particles, Detectors and Instrumentation, Madurai, India, Yasuo Arai, 'Radiation image sensor with Silicon-On-Insulator technology', 招待講演.
- 新井康夫, 2014.12.4, 'SOI技術による量子イメージング研究', 第4回可視赤外線観測装置技術ワークショップ@三鷹天文台、招待講演。
- Y. Arai, 2014.12.1-2, 2nd Asian Image Sensors and Imaging Systems Symposium, 'Radiation image sensor with SOI technology', Invited Talk. 東京工業大学. 招待講演.
- Y. Arai, 2014.9.15-17, 'Lapis SOI Technology and Activities', Workshop on Active CMOS Pixel Sensors for Particle Tracking (CPIX14), Bonn, Germany, 招待講演.

#### A02: SOI 技術を用いた極低ノイズ・高速イメージングデバイスの研究

##### [雑誌論文]

- ◎A. Takeda, T. Go Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, H. Matsumura, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, S. Shrestha "Improvement of Spectroscopic Performance using a Charge-sensitive Amplifier Circuit for an X-Ray Astronomical SOI Pixel Detector, 査読有, JINST Accepted
- ◎M. Motoyoshi, T. Miyoshi, M. Ikebe, Y. Arai, "3D integration technology for sensor application using less than 5µm-pitch gold cone-bump connpdfection", Journal of Instrumentation, 査読有, Vol. 10, March 2015, doi:10.1088/1748-0221/10/03/C03004
- K. Yasutomi, T. Usui, S-M. Han, T. Takasawa, K. Kagawa, S. Kawahito, "An indirect time-of-flight measurement technique with impulse photocurrent response for sub-millimeter range resolved imaging," OPTICS EXPRESS, 査読有, Vol.22, No.16, pp. 18904-18913, August. 2014
- M-W. Seo, S. Kawahito, K. Yasutomi, K. Kagawa, N. Teranishi, "A Low Dark Leakage Current High-Sensitivity CMOS Image Sensor With STI-Less Shared Pixel Design," IEEE Transactions on Electron Devices, 査読有, Vol.61, Issue6, pp.2093 - 2097, June 2014.
- ◎A. Takeda, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Matsumura, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, S.

- Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, S. Shrestha, "Development and Evaluation of an Event-Driven SOI Pixel Detector for X-Ray Astronomy", in Proceedings of Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, 査読有, Amsterdam Netherlands, 2-6 Jun 2014 [PoS(TIPP2014)138]
6. ©T. Go Tsuru, H. Matsumura, A. Takeda, T. Tanaka, S. Nakashima, Y. Arai, K. Mori, R. Takenaka, Y. Nishioka, T. Kohmura, T. Hatsui, T. Kameshima, K. Ozaki, Y. Kohmura, T. Wagai, D. Takei, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, S. Shrestha, "Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor", Proceedings of the SPIE, 査読無, vol. 9144, pp. 914412-1 – 7, 2014.
  7. M. Ikebe, "Recent progress in the technology linking sensors and digital circuits", IEICE Electronics Express, 査読有, Vol.11, No.3, pp.2014-2023, 2014.2.10.
  8. B. Zhang, K. Kagawa, T. Takasawa, M-W. Seo, K. Yasutomi, S. Kawahito, "RTS Noise and Dark Current White Defects Reduction Using Selective Averaging Based on a Multi-Aperture System," Sensors 2014, 査読有, Vol.14, No.1, pp.1528-1543, January. 2014.
  9. M.A. Mustafa, M-W.Seo, S. Kawahito, K. Yasutomi, K. Kagawa, "RTS Noise Reduction of CMOS Image Sensors Using Amplifier-Selection Pixels", IEICE Electronics Express, 査読有, Vol.10, No.15, pp1-7, 2013.7.11.

[学会発表]

1. M. Ikebe, D. Uchida, Y. Take, M. Someya, S. Chikuda, K. Matsuyama, T. Asai, T. Kuroda, M. Motomura, "Image Sensor/Digital Logic 3D Stacked Module featuring Inductive Coupling Channels for High Speed/Low-Noise Image Transfer," *Symposia on VLSI Technology and Circuits 2015*, 2015. 6.17 (accepted)
2. 川人祥二, "新機能イメージセンサの開発とベンチャー起業", ナノテク国際連携セミナー, 長野市, 2015.3.18.(招待講演)
3. D. Uchida, M. Ikebe, J. Motohisa, E. Sano, "Low Power Single-Slope ADC with Intermittent-Working Time to Digital Converter", 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'15), Kuala Lumpur, Malaysia, Mar. 1. 2015
4. 川人祥二, 香川景一郎, 安富啓太, 徐珉雄, 李卓, 寺西信一, "機能集積イメージセンサの開発動向と今後の展開", 電子情報通信学会 SNT 研究会, システムナノ技術に関する時限研究専門委員会, 第1回研究会, pp.59-69, 東京, 2015.2.5.(招待講演)
5. S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, W-M. Seo, Z. Li, M. Kamel, H-J. Yoon, T. Takasawa, N. Teranishi, "Present Status and Future Prospects of Silicon Imaging Devices", 2015 International Symposium toward the Future of Advanced Researches in Shizuoka University, KN-1, pp.23-26, Hamamatsu, Japan, 2015.1.27.(Invited)
6. 川人祥二, 安富啓太, 徐珉雄, 香川景一郎, "高時間分解ロックインピクセルイメージセンサと応用", 第54回光波センシング技術研究会講演会, 講演論文集, LST54-19, pp.139-146, 東京, 2014.12.10.(招待講演)
7. D. Uchida, M. Ikebe, J. Motohisa, E. Sano, "A 12-bit, 5.5- $\mu$ W Single-Slope ADC using Intermittent Working TDC with Multi-phase Clock Signals", 21<sup>st</sup> IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (ICECS 2014), Marseille, France, Dec. 9, 2014
8. M. Ikebe, "Column parallel SS-ADC with TDC using multi-phase clock signals for CMOS imagers", 映像情報メディア学会, 情報センシング研究会 (IST), Dec., 1, 2014, (招待講演)
9. H. Kamehama, S. Shrestha, K. Yasutomi, K. Kagawa, A. Takeda, T-G. Tsuru, Y. Arai, S. Kawahito, "Fully Depleted SOI Pixel Photo Detectors With Surface Potential Pinning", 映像情報メディア学会, 情報センシング研究会 (IST) 2nd Asian Image Sensors and Imaging Systems Symposium, 映像情報メディア学会技術報告, vol.38, no.47, IST2014-81, pp.57-58, 東京, 2014.12.1.
10. K. Kagawa, T. Takasawa, M-W. Seo, K. Yasutomi, S. Kawahito, "Designing CMOS Image Sensors As a Key Building Block of New Camera Systems," "The 16th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium", proceedings, NM2-1-1~NM2-1-2, Hamamatsu, Japan, 2014.11.12.
11. S. Kawahito, "Highly Time Resolved Photonic Imaging Devices and Their Applications", THU-CAS-JSPS Joint Symposium "Emerging Photonics", proceedings, no.2, 清华大学, Beijing, China, 2014.11.7.(Invited)
12. M-W. Seo, T. Takasawa, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, "A Low-Noise High-Sensitivity CMOS Image Sensor for Scientific and Industrial Applications", IEEE SENSORS 2014, pp.2163-2166, Valencia, Spain, 2014.11.5.
13. ©鶴剛, 松村英晃, 武田彩希, 田中孝明, 中島真也, 新井康夫, 森浩二, 竹中亮太, 西岡祐介, 幸村孝由, 初井宇記, 尾崎恭介, 香村芳樹, 和賀井達也, 武井大, 亀島敬, 川人祥二, 香川景一郎, 安富啓太, 亀濱博紀, S. Shrestha, "SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 10: 開発の現状", 日本天文学会, 山形大学, 2014.09.11-13
14. S. Kawahito, "Highly Time-Resolved CMOS Image Sensors and Their Applications", The 7th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro/Nano Technologies(APCOT 2014), KeynoteV, pp.87, Daegu, South Korea, 2014.7.1(Keynote, Invited)
15. S. Kawahito, K. Yasutomi, "CMOS Time-of-Flight 3D Image Sensors with Electric Field Modulation", Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CC3DMR)2014, 3D Res. I, pp.476~478, Seoul, South Korea, 2014.6.26.(Invited)
16. ©T. G. Tsuru, H. Matsumura, A. Takeda, T. Tanaka, S. Nakashima, Y. Arai, K. Mori, R. Takenaka, Y. Nishioka, T. Kohmura, T. Hatsui, T. Kameshima, K. Ozaki, Y. Kohmura, T. Wagai, D. Takei, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, S. Shrestha, "Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor", SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, Montreal, Canada, 2014.06.22-27.
17. ©T. G. Tsuru, H. Matsumura, A. Takeda, T. Tanaka, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, T. Hatsui, T. Kameshima, K. Ozaki, Y. Kohmura, T. Wagai, D. Takei, S. Kawahito, "Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor", FEE2014 Argonne National Labo, USA,

2014.05.20-23

18. 川人祥二, “ラテラル電界制御電荷変調ピクセルを用いた光飛行時間型距離画像センサ”, 第154回次世代画像入力ビジョンシステム部会 定例会, 東京, 2014.4.10.
19. S.Kawahito, “Innovation in charge domain global shutter technologies”, Image Sensors 2014, 16.4, pp.1-31, London, 2014.3.19(Invited)
20. 川人祥二, 亀濱博紀, Sumeet Shrestha, 安富啓太, 香川景一郎, 池辺将之, 新井康夫, “SOIピクセルイメージセンサと科学計測応用”, 映像情報メディア学会, 情報センシング研究会 (IST), Vol.38, No.15, pp35-37, 東京, 2014.3.14.
21. K.Yasutomi, S.Kawahito, “High-resolution TOF range imagers with Lateral Electric Field Modulators”, Time of Flight Imaging Devices and Applications workshop, Israel, 2014.3.9-13.(Invited)
22. S.Kawahito, “Low Noise High Dynamic Range CMOS Image Sensor”, SEMICON Korea 2014, Seoul, 2014.2.14(Invited)
23. H.Kamehama, K.Yasutomi, K.Kagawa, S.Kawahito, “Thermal Analysis of a Cooling Module for an Image Sensor with Thermally Isolated Pixel Area”, EDAPS2013 (IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems), OS5-3, pp142-145, Nara, Japan, 2013.12.14

#### [図書]

1. 池辺将之 (第4章担当分), 次世代自動車の運転支援システムと求められる制御技術, 第4章 次世代自動車の運転支援システムを実現するセンサ・カメラ・通信技術, “CMOSイメージセンサの広ダイナミックレンジ (HDR) 撮像・HDR圧縮技術”, (株)技術情報協会, 2015年8月 確定、総ページ数 約500ページ (うち12ページ担当)
2. Makoto Narue 編著, N.Tate, M.Ando, M.Ohtsu, S.Kawahito, 他著者26名, 第6章「Single Photoelectron Manipulation and Detection with Sub-Nanosecond Resolution in CMOS Imagers」, pp.145-159 担当, Springer 社, 2014.

#### B01: 宇宙最初期ブラックホールの探査研究を実現する衛星搭載X線精密イメージングの開拓

1. ©A.Takeda, T.Go Tsuru, T.Tanaka, H. Uchida, H. Matsumura, Y. Arai, K.Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T.Kohmura, S. Nakashima, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, and S. Shrestha, Improvement of Spectroscopic Performance using a Charge-sensitive Amplifier Circuit for an X-Ray Astronomical SOI Pixel Detector, 2015, JINST, 10, C06005, doi:10.1088/1748-0221/10/06/C06005 (査読有)
2. ©H. Matsumura, T.Go Tsuru, T.Tanaka, A.Takeda, Y. Arai, K.Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T.Kohmura, S. Nakashima, T. Hatsui, Y. Kohmura, D. Takei, T. Kameshima, Improving charge-collection efficiency of SOI pixel sensors for X-ray astronomy, 2015, NIM A, 794, 255-259, doi:10.1016/j.nima.2015.05.008 (査読有)
3. Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor, T.G.Tsuru (21名中1番目), 2014, Proc. SPIE, 9144, pp. 914412 (7pages), 査読無
4. Design and Evaluation of a SOI Pixel Sensor for X-ray Trigger-Driven Readout, A.Takeda, T.G.Tsuru (15名2番目), S.Nakashima, 2014, PoS, Accepted, 査読有
5. Investigation of charge-collection efficiency of Kyoto's X-ray astronomical SOI pixel sensors, XRPIX, H.Matsumura, T.G.Tsuru (8名中2番目), S.Nakashima, 2014, NIM A, 765, 183-186, 査読有
6. Design and Evaluation of a SOI Pixel Sensor for X-ray Trigger-driven Readout, A.Takeda, T.G.Tsuru (8名中5番目), S.Nakashima, 2013, IEEE TNS, 60, 586-591, 査読有
7. Development and characterization of the latest X-ray SOI pixel sensor for a future astronomical mission, S.Nakashima, T.G.Tsuru (9名中4番目) NIM A, 731, 74-78 (2013) 査読有
8. Tests With Soft X-rays of an Improved Monolithic SOI Active Pixel Sensor, S.G.Ryu, T.G.Tsuru (13名中2番目), S.Nakashima, 2013, IEEE TNS, 60, 465-469, 査読有

#### [学会発表]

1. (国際会議招待口頭講演) Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor – XRPIX, T.G.Tsuru (22名中1番目), in SOIPIX2015, held in Sendai, Japan, June 3-4, 2015
2. (国際会議招待講演) Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor, T.G.Tsuru (8名中1番目), H. Matsumura, A.Takeda, T.Tanaka, Y.Arai, K.Mori, Y.Nishioka, R.Takenaka, T.Kohmura, S.Nakashima, T. Hatsui, T. Kameshima, K.Ozaki, Y.Kohmura, T. Wagai, D.Takei, S. Kawahito, 2014, in FEE2014 “Front End Electronics 2014”, held May, 2014 at Argonne National Laboratory, Lemont, IL, USA
3. (国際会議口頭講演) Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor', T.G.Tsuru (19名中1番目), “Scientific Detector Workshop 2013” held in Florence, Italy, Oct. 7-11, 2013
4. (国際会議口頭講演) Development of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor, T.G.Tsuru (19名中1番目), “SOI Collaboration Meeting at Krakow”, held in Krakow, Poland, May 06-07, 2013

#### B02: ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く 極低温 SOI 赤外線イメージングの開拓

#### [雑誌論文]

1. \*Hirokazu Kataza, Itsuki Sakon, Takehiko Wada, Yuki Sarugaku, Naofumi Fujishiro, Yuji Ikeda, Shinji Mitani, Youichi Ohyama, Naoto Kobayashi, “Performance Estimation of the Mid-infrared Camera and Spectrometer Aboard SPICA”, Journal of Astronomical Instrumentation, Vol. 4, 1550001 (19 pages), 2015, 査読あり

#### [学会発表]

1. ©T.Wada, H.Kaneda, Y. Arai, Y. Hattori, H.Ikeda, K. Kobata, K. Nagase, T. Suzuki, K. Tanaka, K.Watanabe, H.Nakaya, M. Ohno, S. Baba, C. Kochi, “Development for germanium FIR image sensors”, in 10<sup>th</sup> International

Workshop on Low temperature Electronics, 2013/10/14-2013/10/17, Universite Paris Diderot, Paris, France

2. K. Nagase, T. Wada, H. Ikeda, Y. Arai, M. Ohno, "Development of cryogenic readout circuit for far-infrared image sensors with fully-depleted silicon-on-insulator (FD-SOI) CMOS process", in 10<sup>th</sup> International Workshop on Low temperature Electronics, 2013/10/14-2013/10/17, Universite Paris Diderot, Paris, France
3. K. Nagase, T. Wada, H. Ikeda, Y. Arai, M. Ohno, "Cryogenic CMOS analog switch for far-infrared image sensors", in International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2013, 2013/12/02-2013/12/03, Vietnam National Satellite Center (VNSC), Melia Hote, Hanoi, Vietnam
4. 長勢晃一、和田武彦、池田博二、新井康夫、大野守史、遠赤外線画像センサーのための極低温読み出し回路～CMOS アナログスイッチ～、日本天文学会 2014 年春季年会、2014 年 03 月 19 日～03 月 22 日、国際基督教大学
5. T. Wada, H. Kaneda, K. Watanabe, T. Suzuki, Y. Arai, H. Ikeda, H. Nakaya, M. Ohno, K. Nagase, Y. Hattori, K. Kobata, S. Baba, C. Kochi, K. Tanaka, M. Hanaoka, "Development of Ge BIB far-infrared image sensors with FD-SOI CMOS ROIC", in Millimeter, submillimeter, and Far-infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VII, 2014/06/24-2014/06/27, Montreal, Canada.
6. M. Hanaoka, H. Kaneda, S. Oyabu, Y. H., K. Tanaka, T. Wada, T. Suzuki, K. Watanabe, K. Nagase, S. Baba, C. Kochi, "Evaluation of Far-infrared BIB-type Ge detectors fabricated with the surface-activated wafer bonding technology", in The universe in the light of Akari and synergy with future large Space Telescopes, 2014/07/09-2014/07/11, Oxford, UK
7. 花岡美咲、金田英宏、大藪進喜、服部和生、田中琴未、鶴飼壮太、和田武彦、鈴木仁研、渡辺健太郎、長勢晃一、公地千尋、馬場俊介、宇宙観測用接合型 Ge 遠赤外線検出器のアレイ化に向けた物理パラメータの決定、日本天文学会 2015 年春季年会、2015/03/18-2015/03/21、大阪大学

[社会・国民への発信]

1. 天文学・天体物理学を研究する若手研究者のために毎年夏に開催される合宿型の研究会である、天文・天体物理若手夏の学校にて赤外線センサーの開発に関する講演を行った。和田武彦、「赤外線画像センサーの基礎と開発の実際」、2014 年度第 44 回天文・天体物理若手夏の学校、招待講演

#### C01: 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング

[学会発表]

1. 飛田尚志 SOI ピクセル検出器の放射線損傷による回路特性の変動の評価(II), 2015 年 3 月 24 日(火) 早稲田大学 早稲田キャンパス
2. 浅野麻莉 高エネルギー実験のための 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の特性評価 (II), 2015 年 3 月 24 日(火) 早稲田大学 早稲田キャンパス
3. 本多俊介 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の TID 放射線耐性の評価(IV), 2015 年 3 月 24 日(火) 早稲田大学 早稲田キャンパス
4. S. Honda, Total Ionization Damage Compensations in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensors, TIPP 2014, 2-6 June 2014, Amsterdam, The Netherland
5. K. Hara, Initial Characteristics and Radiation Damage Compensation of Double Silicon-on-Insulator Pixel Device, K. Hara, VERTEX2014, 15-19 Spe. 2014, Macha Lake, The Czech Republic.
6. S. HONDA, K. HARA, K. TSUCHIDA, M. ASANO, N. TOBITA, T. MAEDA, Y. ARAI, T. MIYOSHI, T. TSURU, M. OHNO, N. MIURA, H. KASAI, M. OKIHARA, Total Ionization Damage Compensations in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensors, PoS (TIPP2014)039.
7. K. Hara, M. Asano, S. Honda, N. Tobita, Y. Arai, I. Kurachi, S. Mitsui, T. Miyoshi, T. Tsuboyama, Initial Characteristics and Radiation Damage Compensation of Double Silicon-on-Insulator Pixel Device, K. Hara, PoS(VERTEX2014)033.
8. K. Hara, Compensation of Radiation Effect in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensor, IEEE2014, 13 Nov. 2014, Seattle, USA.

#### C02: X 線自由電子レーザーによる超高速ナノ構造解析用検出器

[雑誌論文]

1. "Analysis of Effective Gate Length Modulation by X-ray Irradiation for Fully-Depleted SOI p-MOSFETs", I. Kurachi, K. Kobayashi, M. Okihara, H. Kasai, T. Hatsui, K. Hara, T. Miyoshi, and Y. Arai, IEEE Transaction on Electron Devices, *in press*. (査読あり)
2. ©"Improving charge-collection efficiency of SOI pixel sensors for X-ray astronomy", H Matsumura, TG Tsuru, T Tanaka, A Takeda, Y Arai, K Mori, Y Nishioka, R Takenaka, T Kohmura, S Nakashima, T. Hatsui, Y Kohmura, D Takei, T. Kameshima, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 794 (2015) 255-259. (査読あり)
3. "Data acquisition system for X-ray free-electron laser experiments at SACLA", Y. Joti, T. Kameshima, M. Yamaga, T. Sugimoto, K. Okada, T. Abe, Y. Furukawa, T. Ohata, R. Tanaka, T. Hatsui, M. Yabashi, J. of Synchrotron Radiation, 22 (2015) 571-576. (査読あり)
4. "Development of Experimental Methodology for Highly Efficient Wafer-Level Evaluation of X-Ray Radiation Effects on Semiconductor Devices", Togo Kudo, Kazuo Kobayashi, Shun Ono, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, Masao Okihara, and Takaki Hatsui, IEEE Trans. Nuclear Science, Vol.61, Issue 3, 10.1109/TNS.2014.2321766 (2014) (査読あり)
5. "Evaluation of data-acquisition front ends for handling high-bandwidth data from X-ray 2D detectors: A feasibility study", C. Saji, T. Ohata, T. Kudo, T. Sugimoto, R. Tanaka, T. Hatsui, M. Yamaga, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 731

(2013) 229-233. (査読あり)

6. “A direct-detection X-ray CMOS image sensor with 500 μm thick high resistivity silicon”, T. Hatsui\*, M. Omodani, T. Kudo, K. Kobayashi, T. Imamura, T. Ohmoto, A. Iwata, S. Ono, Y. Kirihara, T. Kameshima, H. Kasai, N. Miura, N. Kuriyama, M. Okihara, Y. Nagatomo, M. Nagasaki, T. Watanabe, Makina Yabashi, Proceedings of International Image Sensor Workshop, (2013) Art. Num. 3.05 (査読あり)
7. “X-ray imaging detectors for synchrotron and XFEL sources”, Takaki Hatsui\*, and Heinz Graafsma\* IUCrJ, 2015, Vol. 2(3), p. 371-383. 学術雑誌(査読あり) invited review
8. “Developments of X-ray Imaging Detectors at SACLA/SPring-8: Current Status and Future Outlook”, Takaki Hatsui, Synchrotron Radiation News, 2014, Vol. 27(4), p. 20-23. (査読なし)
9. 他関連論文 (査読あり) 8報

#### 【学会発表(国内)】

1. “放射光 X線による物質構造解析のための二次元 SOI ピクセル検出器の評価”, 橋本亮, 岸本俊二, 熊井玲児, 五十嵐教之, 新井康夫, 三好敏喜, 初井宇記, 工藤統吾, 第28回日本放射光学会年会、2015.1.11、立命館大学
2. “シリコン X線 2次元検出器の課題と解決策”, 初井宇記, 小野峻, 亀島敬, 工藤統吾, 尾崎恭介, 小林和生, 桐原陽一, 遠茂谷誠彦, 矢橋牧名, 第27回日本放射光学会年会、2015.1.12、広島市

#### 【招待講演発表(国際)】

1. Takaki Hatsui, "X-ray Imaging Detectors at SACLA: Current Status and Future Perspectives", (6th Ringberg Meeting on Science with FELs, Schloss Ringberg, Germany, Feb. 22nd, 2015)
2. N. Teranishi, and T. Hatsui, "X-ray image sensors for SACLA and future Ultimate Storage Ring Light Sources", Workshop on Active CMOS Pixel Sensors for Particle Tracking (CPIX14) (Bonn, Germany, Sept. 2014).
3. Takaki Hatsui "Direct-detection Monolithic Active Sensors for X-ray Free-Electron Lasers and ultimate storage ring light sources", (Position Sensitive Detectors PSD10 Surrey, UK, Sept. 7th-10th, 2014)
4. Takaki Hatsui (invited review), "Developments of Detectors for XFEL experiments", Workshop on Crystallography at XFEL Sources, (IUCr Congress, Montreal, Canada, August 5th, 2014)
5. T. Hatsui "Direct-detection Monolithic sensors for X-ray Free-Electron Lasers and ultimate storage ring light sources", (International Workshop on Radiation Imaging Detectors iWoRID 2014, Trieste Italy, June 26th, 2014)
6. Takaki Hatsui "SOPHIAS for the X-ray Free-Electron Laser Experiments: Lessons and Outlook of SOI Pixel Process", (Front-end Electronics 2014, Argonne Illinois, USA, May 20th, 2014)
7. T. Hatsui, "SOI Pixel Process: Lessons Learned from the Development of SOPHIAS, a Sensor for X-ray Free-Electron Laser Experiments", Research Techniques Seminar, (Fermil National Accelerator laboratory, Batavia, Illinois, USA, August 1st, 2013)
8. T. Hatsui, "SOI Pixel Development at SPring-8", Three-way meeting, (Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA, July 30th, 2013)
9. T. Hatsui, "X-ray 2D detectors for SACLA: Current Status and Future Perspective", The 12th Symposium on X-ray Imaging Optics (Osaka, Nov. 18th, 2013).

#### 【招待講演発表(国内)】

1. 工藤統吾, 小林和生, 小野峻, 寺西信一, 渡邊健夫, 木下博雄, 沖原将生, 初井宇記, “半導体デバイスの X線照射耐性に関する迅速評価方法の開発”, (応用物理学会シリコンテクノロジー研究会, 東京, 3/3 2014).

#### D01: 放射光を用いた空間階層構造とダイナミクス研究のためのイメージング

##### [研究会等発表]

1. 岸本 俊二, 熊井 玲児, 五十嵐 教之, 橋本 亮, 「放射光利用研究のための計数型 2次元 X線検出器の開発」第2回新学術領域「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」研究会、2014年5月9日、大阪大学 豊中キャンパス H棟7階

##### [学会発表]

1. 橋本 亮, 岸本 俊二, 熊井 玲児, 五十嵐 教之, 新井 康夫, 三好 敏喜, 初井 宇記, 工藤 統吾 「放射光 X線による物質構造解析のための二次元 SOI ピクセル検出器の評価」第28回日本放射光学会年会・合同シンポジウム, 2015年01月12日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス

#### D02: 投影型イメージング質量分析による迅速で高解像度な生体内分子イメージング

##### 【発表論文】

1. \*間久直, 栗津邦男: “投影型イメージング質量分析装置の開発動向,” オプトニュース 10(1), 2-9 (2015), 査読無し.
2. \*岡崎文音, 間久直, 栗津邦男: “投影型イメージング質量分析計の空間分解能向上に向けたイオン軌道シミュレーション,” 電気学会研究会資料 OQD-15-022, 11-15 (2015), 査読無し.
3. H. Kannen, \*H. Hazama, Y. Kaneda, T. Fujino, and K. Awazu: “Development of laser ionization techniques for evaluation of the effect of cancer drugs using imaging mass spectrometry,” Int. J. Mol. Sci. 15(7), 11234-11244 (2014), 査読有り.
4. \*間久直, 守口直輝, 藤野竜也, 栗津邦男: “マトリックス支援レーザー脱離イオン化を用いた薬剤のイメージング質量分析に向けたゼオライトによるイオン化効率の向上,” 電学誌 C 134(5), 657-663 (2014), 査読有り.
5. \*J. Aoki, S. Ikeda, and M. Toyoda: “Observation of accumulated metal cation distribution in fish by novel stigmatic imaging time-of-flight mass spectrometer,” J. Phys. Soc. Jpn. 83(2), 023001 (2014), 査読有り.

6. \*T. Satoh, A. Kubo, H. Hazama, K. Awazu, and M. Toyoda: "Separation of isobaric compounds using a spiral orbit type time-of-flight mass spectrometer, MALDI-SpiralTOF," *Mass Spectrom.* 3(2), S0027 (2014), 査読有り.

【国際会議発表】

1. Y. Fujita, Y. Ikemoto, Y. Arai, Y. Kawai, H. Matsuoka, H. Hazama, J. Aoki, M. Toyoda, and K. Awazu: "Development of a time and position detectable detector for a stigmatic imaging mass spectrometer," IEEE Nuclear Science Symposium, Washington State Convention Center, Seattle, WA, USA (8–15 Nov. 2014).
2. Y. Kawai, H. Matsuoka, H. Hazama, J. Aoki, M. Toyoda, Y. Fujita, Y. Ikemoto, Y. Arai, and K. Awazu, "Development of a time and position sensitive ion detector for a stigmatic imaging mass spectrometer," 20th International Mass Spectrometry Conference, Centre International de Conférences Genève, Geneva, Switzerland (26 Aug. 2014).
3. J. Aoki, H. Hazama, K. Awazu, and M. Toyoda: "Development of new stigmatic imaging mass spectrometer and its application for surface analysis of high functional organic materials," 20th International Mass Spectrometry Conference, Centre International de Conférences Genève, Geneva, Switzerland (25 Aug. 2014).
4. J. Aoki, H. Hazama, K. Awazu, and M. Toyoda: "Development of new stigmatic imaging mass spectrometer and its application to surface analysis of high functional organic materials," 62nd ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics, Baltimore Convention Center, Baltimore, MD, USA (19 Jun. 2014).

A01-I: PSS-SOI 高分解能検出器の開発および応用

[学会発表]

1. Atiqah Fairuz, Yuri Yoshihara, Kenji Shimazoe, Hiroyuki Takahashi, Ayaki Takeda, Takeshi Tsuru, Yasuo Arai, Electron Track Recognition with SOI sensor for Advanced Compton Imaging, 応用物理学会, 2015年03月11日～2015年03月14日, 東海大学、神奈川県
2. Kenji Shimazoe, Yuri Yoshihara, Atiqah Fairuz, Hiroyuki Takahashi, Ayaki Takeda, Takeshi Tsuru, Yasuo Arai, Development of electron tracking Compton camera with Event Driven SOI sensor, International Workshop on Radiation Imaging Detectors 2015, 2015年06月28日～2015年07月02日, Hunburg, Germany

A01-II: ワイドレンジプラズモンフィルタを実装した SOI 量子イメージセンサの開発

[原著論文]

1. \*Atsushi Ono, Naoya Shiroshita, Masakazu Kikawada, Wataru Inami, and Yoshimasa Kawata, "Enhanced photoelectron emission from aluminum thin film by surface plasmon resonance under deep-ultraviolet excitation", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 48, 18, 184005 (2015). 査読あり
2. Masakazu Kikawada, Atsushi Ono, Wataru Inami, and Yoshimasa Kawata, "Enhanced multicolor fluorescence in bioimaging using deep-ultraviolet surface plasmon resonance", *Appl. Phys. Lett.* 104, 22 (2014). 査読あり

[招待講演]

3. Atsushi Ono, Seiya Toriyama, Vygantas Mizeikis, "Direct laser writing of metallic nano structures by femtosecond laser assisted photoreduction", The 4th international conference on manipulation, manufacturing and measurement on the nanoscale, 27th-31st, Oct. 2014, Taipei, Taiwan.

A02-I: 軟 X 線用の背面反射回折環二次元イメージング機構の開発

[学会発表]

1. 佐々木敏彦, 回折 X 線の二次元イメージングによる工業部品の材料評価, 第 3 回新学術領域研究会, 2014 年 11 月 26 日～2014 年 11 月 27 日, 金沢工業大学(石川県、金沢市)

A02-II: 究極のエネルギー分解能を持つ大面積 X 線検出器の開発

[雑誌論文]

1. 石野宏和, 樹林敦子, 山田要介, 岡本晃範, 喜田洋介, 羽澄昌史, 佐藤伸明, 神代暁, 山森弘毅, フォノン・フォトン検出用 kinetic Inductance Detectors, 信学技報 IEICE Technical Report, SCE2014-42, 2014, pp. 43-47.

[学会発表]

1. Hirokazu Ishino, Development of Microwave Kinetic Inductance Detector for phonon and photon detections, Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, 2014 年 06 月 02 日～2014 年 06 月 06 日, Amsterdam
2. 樹林敦子, 超伝導検出器と SOI 検出器を組み合わせた X 線検出器の開発(2), 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 03 月 21 日～2015 年 03 月 24 日, 早稲田大学

## 6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

この領域研究では計画班を大きく4つに分け、コア技術(A01/A02)班、宇宙(B01/B02)班、先端加速器(C01/C02)班、生体・物質構造(D01/D02)班とし、これに公募研究を追加し研究を進めている。これらはまた、センサ技術を担う A01/A02 班と、サイエンスを目指す B01~D02 班に分ける事もできる。これらは複雑に連携しているが、大雑把なつながりを図 18 に示す。総括班はこれらの研究を効率的に進め、各研究班間の連絡・調整を行う役割を担っている。また、共同研究コーディネータは、具体的に必要なアドバイス、共同研究のプロモーション等を行い、さらに連携を深めるように働いている。

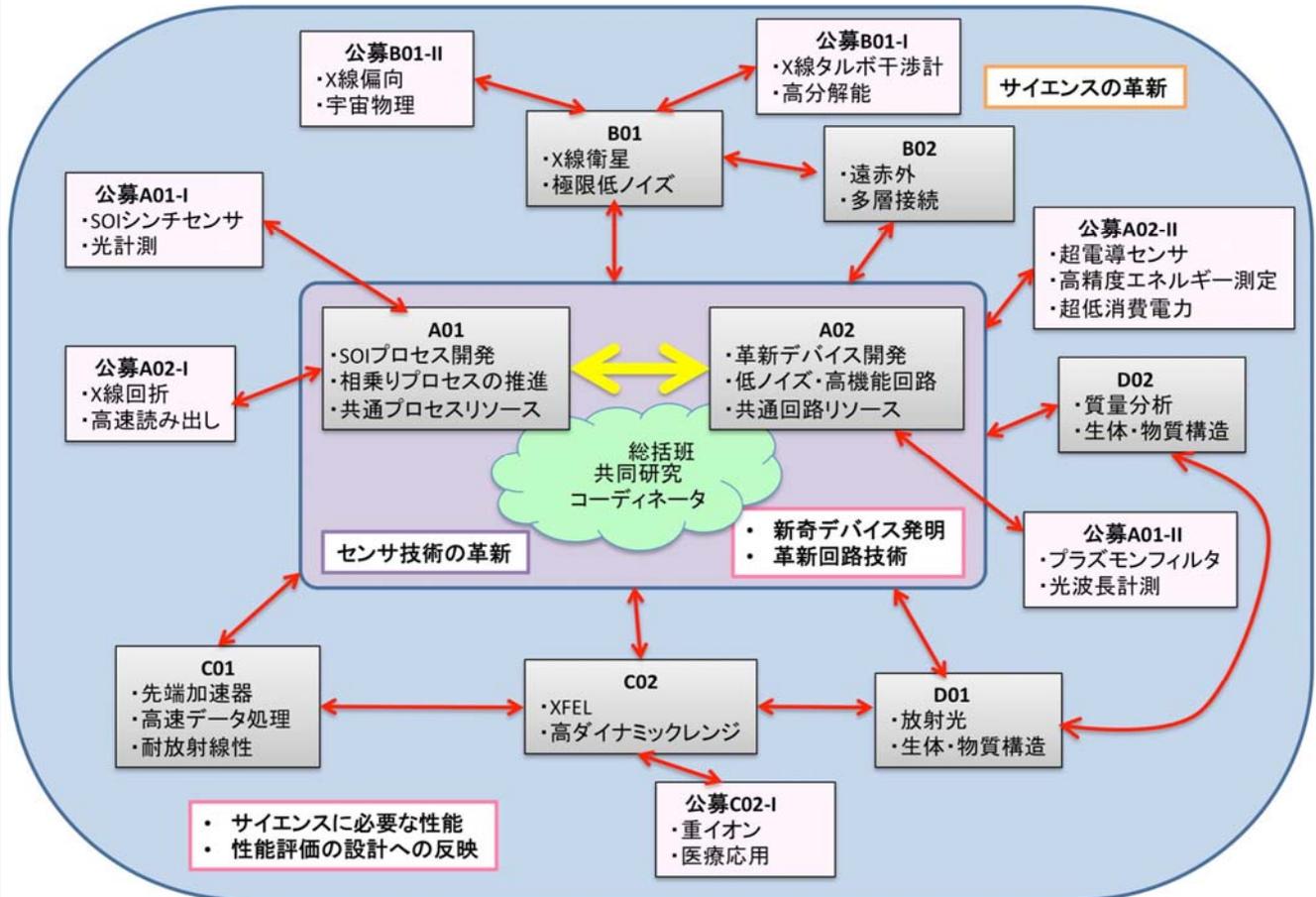


図 18. 研究項目と各計画研究班の連携状況の概略。

これらの連携の中で、キーとなる研究項目に関し、以下に状況を示す。

### ・センサ技術開発

SOIのセンサ技術に関する研究項目では主にA01班とA02班が協力して研究を行っており、新奇デバイスの発明や革新的な回路技術の研究に勤めている。

### ・SOIプロセス開発

A01班を中心にプロセス開発を行っているが、各種測定はサイエンス班に行ってもらう事が多い。また得られた結果を反映させ、次の機会のプロセスに変更が生じる場合は全体に対しアナウンスを行っている。

### ・極限環境計測

実際の実験環境で要求される極限環境計測(放射線耐性、極低温動作等)ではB01/B02班、C01/C02班で共通な項目も多く、協力して研究を行っている。

### ・共通回路リソース

各研究班で新たに開発した回路やセル・レイアウトはA01班により管理され、順次公開していく。

・低ノイズ測定・回路

低ノイズ測定はすべてのサイエンスにおいて必須の項目であり、A02 班を中心に新たなセンサ構造、回路構成等の提案があり、この結果は B01~D02 班の検出器に生かされる予定である。一例として A02 班により提案された BPSPPIX 構造を図 19 に示す。これは従来おもて面より空乏化を行い電荷収集を行っていたものを、裏面側から空乏化を行い、電荷を小さなセンサ領域に集めるものである。これにより、感度の増加と低ノイズ化が見込まれている。

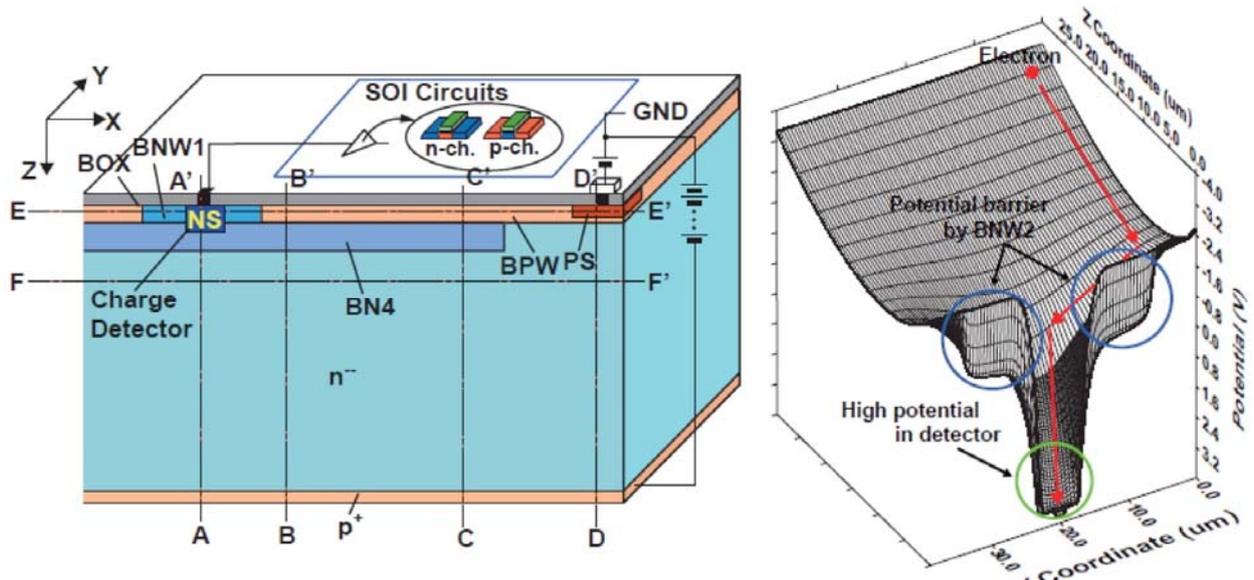


図 19. A02 班により提案された裏面側から空乏化を行い小さなセンサ領域に電荷を集める Back Gate Pinning SOI Pixel (BPSPPIX)構造。

・カメラシステム

B02 班ではすでに動作するセンサが出来ていることから、冷却装置を備えたカメラシステムの開発も行っている。これは D01 班でも利用されると共に、同様システム開発を考えている他の研究班の参考ともなっている。

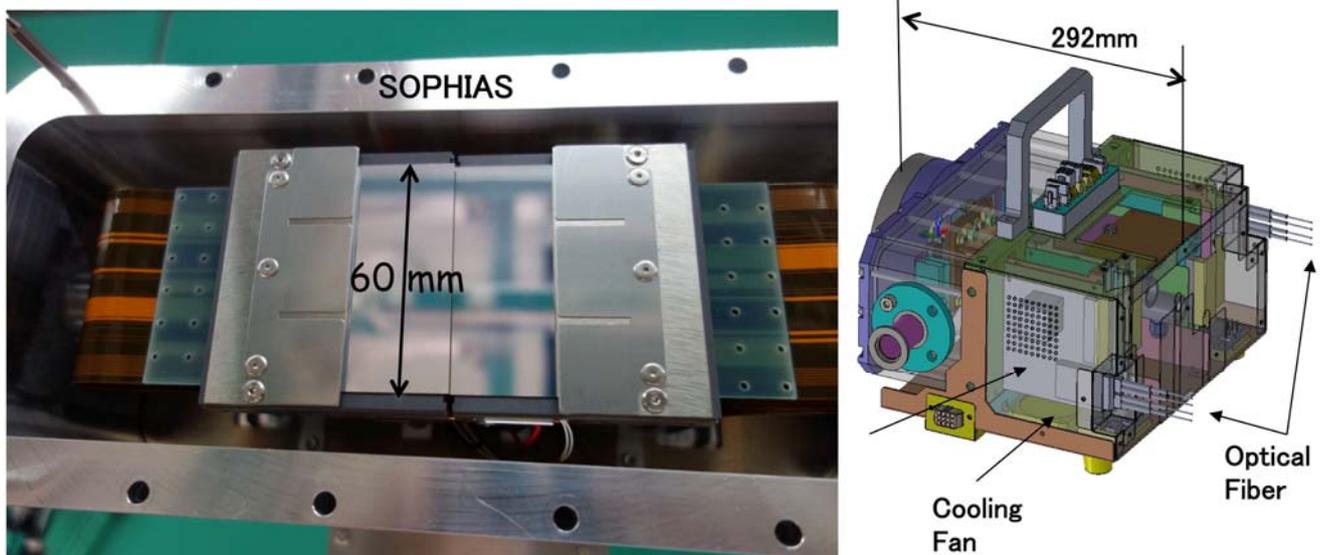


図 20. SOPHIAS 検出器カメラシステム(C02 研究班)。

## 7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ程度）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

若手研究者に対しては、2014年7月に2日間に渡る SOI 検出器設計講習会を行った。ここでは設計のための CAD ツールの使い方から、基本的な構造、設計上の注意等を講習し、また実際に課題を与え実習も行った。講習で使用した教材は Web でも公開し、参加できなかった学生・若手研究者にとっても有用な資料となっている。

またこれまでに以下に示すように3回の国内研究会を行った。また 2015 年6月には国際研究会も準備されており、若手の参加を促すために口頭発表に加えポスター発表も行うこととし、19件のポスター発表申し込みがあった。

2013. 12. 13-14 @京都大学（参加 49名）

2014. 5. 9-10 @大阪大学（参加 53名）

2014. 11. 26-27 @金沢工大（参加 71名）

(2015. 6. 3-5 International Workshop on SOI Detector (SOIPIX2015) @東北大学)

こうした研究会で知り合った若手研究者同士は、個人的にもメール等で情報交換を行っており、交流が図られている。



図 21. 東北大での国際研究集会。

## 8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

領域研究内では、総括班会議等においてそれぞれの施設の持つ計測器等の紹介を随時行い、相互利用している。一例を挙げると、プロービングシステム、半導体パラメータアナライザ、ノイズ測定システム、温度測定システム、恒温槽、真空チャンバー、レーザ照射システム等である。

また放射線耐性試験の為には、幾つかのチップを同時に照射して相互にチップを融通したりしている。特に C02 理研研究班が構築した自動 X 線ウエハー照射装置(図 22 左)は、ウエハー内の特定の素子にバイアス電圧を与えながら自動的に次々と X 線照射を行うことができるものである。A01 班はこれを利用することで多くのデータを集めることができ、トランジスタ特性の解析に非常に役立った。

このほか、KEK において開発した読み出しボード(SEABAS2, 図 22 右)は各種センサチップの試験に欠かせないものとなっており、ほとんどすべての研究班が保持することとなっている。このボード上には個々のセンサを制御する為の FPGA が載っており、センサー毎にカスタマイズされたプログラムを載せる必要があるが、Web 上でそれぞれのセンサーに対するプログラムを公開することで、初心者でも比較的簡単に新しいセンサに対するプログラムを作成できるようになっており、メーリングリストの利用により疑問点に対しては経験者が答える体制ができています。

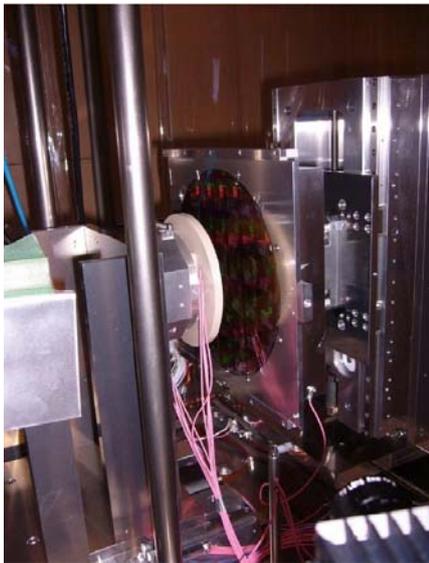


図 22. (左)ウエハーへの X 線自動照射装置。(右)SOI 検出器読み出しボード SEABAS2(SOI Evaluation Board with SiTCP)と INTPIX4 センサ・サブボード。

毎年行っている MPW ランでは、数ヶ月前より事前申し込みを行ってもらう事により、チップエリアの不足や空きエリアが出ないように相互に交渉を行っている。

## 9. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

### 【本研究領域全般の評価】

本研究領域では、Silicon On Insulator (SOI) 技術の基礎研究をベースに、宇宙・素粒子・物質構造のイメージング検出器技術にブレークスルーをもたらすことを目的としている。その実現のため、計画研究 A01 班で SOI プロセス技術の開発や相乗り試作のとりまとめを行い、A02 班で SOI 技術を有効活用する基礎回路技術を開発する。A01・A02 で開発された SOI 関連要素技術を B01・B02 などの宇宙・衛星観測、C01・C02 などの先端加速器測定技術、D01・D02 などの生体・物質構造測定技術に展開することにより、SOI 技術を活用した検出器に飛躍的発展をもたらす。また、展開した試作検出器を評価した結果をフィードバックすることによって要素技術をさらに改良し、SOI 技術全体の発展が期待できる。

上述のような本研究領域の目的を達成するためには、計画研究間の情報共有が鍵となるが、本研究領域では、総括班会議を年 4 回(2013 年度は KEK、静岡大学、京都大学、SPRING-8 で、2014 年度は大阪大学、東京大学、金沢工大、宇宙科学研)定期的に開催し、各計画研究における進捗状況や成果を共有し、研究計画を検討している。各総括班会議の資料や報告書は、評価者にも送られており、評価者が進捗状況を把握できるよう配慮されている。

本研究領域では、研究成果を広く共有しさらなる展開を図るため、年 2 回程度の頻度で研究会を開催している。京都大学(2013 年 12 月)と大阪大学(2014 年 5 月)で開催した最初の 2 回は 50 名前後の参加であったが、金沢工大(2014 年 11 月)と東北大学(2015 年 6 月)に開催した最近の 2 回は、それぞれ 71 名と 85 名の参加があり、広報の効果が出てきている。特に東北大学での研究会は、海外からも 10 名程度の参加があり、日本発の検出器技術を世界に広める役割も果たしている。広報活動の一環として、Web サイト<<http://soipix.jp/index.html>>のほか 12 ページのパンフレットを作成して、一般への周知を図っている。さらに、東北大学での国際研究会に連動してエルパーク仙台において「宇宙と素粒子の謎を解き明かす～最先端の 3 次元半導体検出器～」と題する一般向け講演会を行い、120 名の参加者があった。この講演会は事前に河北新報にて 2 回紹介されたほか、開催後もその内容を紹介する記事が掲載された。

本研究領域では、若手研究者の教育にも力を入れており、2014 年 7 月に SOI を利用した検出器の設計講習会を 2 日間開催し、35 名の若手研究者、学生の参加があり好評であった。2015 年度にも同様の講習会をさらに日数を長くして開催する予定である。

### 【本研究領域における研究の進捗状況評価】

#### 【A01】

2013 年度と 2014 年度に計画研究や公募研究から 20 件近い設計をとりまとめ、相乗りプロセスによる試作を実施し、領域全体の施策支援を予定通り進めた。また、double SOI を用いることによりセンサー層と回路層の干渉を低減し、耐放射線特性の向上を図り、3 次元集積回路、SOI の特性を活用した Super Steep Transistor などの基礎技術を開発なども、おおむね順調に進めている。

#### 【A02】

イベント駆動型検出回路、高時間分解完全空乏型ロックイン SOI ピクセルの設計、試作、評価がおおむね順調に進んでいる。

イベント駆動エネルギー弁別回路や電荷集積構造を有する光子検出器、Backgate Pinned SOI pixel と称する新しい構造の SOI ピクセルなどを新規考案するなど、当初の研究計画にはなかった成果も生んでいることは高く評価する。

#### 【B01】

非常に高いエネルギー分解能を有するイベント駆動 SOI ピクセルの開発において、均一な電荷収集特性

や低雑音を実現することが鍵となるが、試作器の製造、評価によって、性能低下の原因を解明した。SPring-8における評価試験の際は、C01 班の支援によって直径 10  $\mu\text{m}$  のペンシルビームを利用してピクセル内部の電荷収集効率の詳細な測定が可能となった。その評価結果に基づき、A02 班の支援を得て読み出し回路を改良した試作器を開発した。

**【B02】**

本計画研究では、SOI 回路が極低温でも動作することを利用したゲルマニウム検出器の信号処理用 SOI 回路とその周辺技術を開発しているが、鍵となるゲルマニウム検出器と信号処理用 SOI 回路を接合するバンプ接合技術の選定を終え、接合実験を前倒しして開始している。接合技術は、予期しない問題が起こることが予想されるため、前倒し実施していることは、リスク低減の観点から評価できる。

**【C01】**

Super KEKB と International Linear Collider のためのピクセル検出器を開発しているが、それぞれ要求が異なるため、別設計のピクセル検出器が必要となる。設計を担当する研究者の雇用の遅れから設計に遅れが生じている。同時に耐放射線性を高める double SOI プロセスによる素子の評価を進めた。

**【C02】**

X 線自由電子レーザーに利用して超高速にナノ構造を解析することを可能にする高いダイナミックレンジをもつ 380 万画素の X 線ピクセル検出器を開発することを目的としている。ノイズ特性を改良しつつ、当初の 2 倍に相当する 10,000 光子までのダイナミックレンジを達成している。さらに、本実験用カメラシステムの構築を前倒しして進めている。また、A01 班や A02 班と協力して放射線材損傷の理解を進めたり、本計画研究で開発した検出器を D01 班に供給するなど新学術領域を有効に活用している。

**【D01】**

A01 班や A02 班の支援のもと 2 次元パルス計数型 X 線検出器を開発しているが、製造プロセスの遅れもあって、評価に至っていない。C02 班で開発された積分読み出し型 SOI センサーを放射光施設に導入し、結晶回折実験に利用している。

**【D02】**

A01 班や A02 班の支援のもと 1 ns の時間分解能をもつピクセル検出器を開発しているが、年 2 回の試作機会を最大限活かして試作・評価を進め、1 ns の分解能を実現する見通しを得ている。イメージング実験をするために必要となるその他の装置の準備も順調に進んでいる。

**【総合評価】**

様々な分野の研究者が集いながらも、各計画研究班がそれぞれ得意な分野において他の計画研究班を助けることで、新学術領域の効果を高めながら順調に研究を進めている。

## 10. 今後の研究領域の推進方策（2 ページ程度）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

この2年間様々な分野の研究者特に若手研究者に SOI 検出器に興味を持ってもらい、これまでにないユニークな研究者集団による新学術領域を作れたと自負している。しかしながら、それぞれの研究者の持つ技術力、研究のベクトルは皆違うので、これらをまとめて運営していくのは大変であった。

センサのレイアウト設計・回路設計に精通した研究者、およびセンサ性能をきちんと評価できる研究者の数はまだ少なく、試行錯誤による時間のロスも多く、今後さらにテーマを絞った研究会や講習会を頻繁に開催することが必要と考えている。このようにすることで、SOI 検出器を設計できる研究者を増やし、様々な分野の研究で生かしてもらえようになりたいと考えている。

一方プロセスの改良には、企業に頼っている部分が多いが、最近の好況により工場の生産能力は一杯となっており、以前よりプロセスに時間がかかるようになってきている。引き続き優先的に半導体プロセスを流してもらう為には、我々の技術力を高めると共に、開発したチップを色々な方面に応用していくことも大事と考える。この為には半導体企業で働いていた方や、製品化に携わっていた方に研究に加わっていただくのがひとつの方法と考えるが、なかなか科研費等の短期間雇用では、人材確保が難しい面がある。

また研究者の数が増えるに従って、プロセスに対する新たな要望も増え、当初予定よりもプロセスに対する支出が多くなる傾向にある。せっかくの新しいアイデアをうずませない為にも、これらの要望にはできるだけ答えていきたいと考えているが、半導体プロセスの高コストは研究者泣かせである。

公募研究では、PET による診断応用や重粒子線を用いたガン治療といった医療応用の研究も取り入れることができたが、いずれも元々は物理や工学系だった研究者が行っているものであり、さらに臨床や基礎医学携わる医師の直接の要望も聞いてみたいと考えている。

海外の研究者との連携では、ポーランドの AGH-Univ. of Science and Technology や IFJPAN の研究者と共同研究を行っている。彼らも SOI 検出器開発で独自の予算を獲得しており、大学院生の日本への派遣等も受け入れている。

中国の高能研(IHEP)や IMECAS の研究者も熱心に SOI 検出器の開発に参加しており、6月の Workshop にも多数参加する予定である。また9月には中国で彼らが主催する国際会議もあるので、われわれの領域研究からも数件発表する予定である。

一方、ヨーロッパや米国では、商用の CMOS プロセスを用いたピクセル検出器の開発が盛んで、次第に性能を上げてきている。こういった開発動向からも目を離さずに、SOI の特徴を活かした研究を続けることが重要であると考えている。



図 23. ポーランド・クラクフでの研究会(2013年5月).